182

THESE

PRESENTEE

A L'UNIVERSITE DE PARIS SUD

CENTRE D ORSAY

POUR OBTENIR

LE titre DE DOCTEUR-INGENIEUR

PAR

Thierry AUDRIC

ingénieur civil des ponts et chaussées

CONTRIBUTION A L'ETUDE GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE DES LIMONS DE PLATEAU DE LA REGION PARISIENNE

SOUTENUE LE 14 FEVR 1973

DEVANT LA COMMISSION D EXAMEN

JURY

MM A RIVIERE Président

M ARNOULD

P SCHAEROL Examinateurs

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548019_0001

THESE

PRESENTEE

A L'UNIVERSITE DE PARIS SUD

CENTRE D ORSAY

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR-INGENIEUR

PAR

Thierry AUDRIC

ingénieur civil des ponts et chaussées

CONTRIBUTION A L'ETUDE GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE DES LIMONS DE PLATEAU DE LA REGION PARISIENNE

SOUTENUE LE

DEVANT LA COMMISSION D EXAMEN

JURY

MM A RIVIERE **Président**

M ARNOULD

Examinateurs

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

AVANT-PROPOS.

Cette étude se situe dans le domaine de la recherche appliquée et plus précisément dans celui de la géologie appliquée au génie civil. Elle fut conduite au Centre de Géologie de l'Ingénieur de l'Ecole des Mines de Paris, sous la direction de M. ARNOULD.

J'avais appris à apprécier M. ARNOULD comme professeur de Géologie à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, et quand il me proposa cette recherche, je l'acceptai avec plaisir. Tout au long de ce travail, il ne cessa de m'apporter son soutien par ses remarques, ses suggestions et par l'esprit de liberté scientifique qu'il avait su créer dans son laboratoire. Je voudrais lui exprimer ici toute ma reconnaissance.

La géologie de l'ingénieur est une discipline nouvelle parmi les sciences de la terre. Comme telle, elle a suscité l'intérêt de M. le Professeur RIVIERE ; je tiens à le remercier ici d'avoir suivi mon travail en l'orientant avec toute sa compétence et son amabilité.

La présence, dans ce jury, de M. est pour moi le témoignage d'un intérêt dont je lui suis reconnaissant.

Sans une importante documentation géotechnique, il n'était pas possible d'envisager les corrélations entre caractéristiques et propriétés géotechniques qui constituent l'orientation principale de cette recherche. L'aéroport de Paris, maitre d'oeuvre des travaux les plus importants sur les sites que j'étudiai m'a, très libéralement, permis d'avoir accès à ses laboratoires et à sa documentation. Cette administration peut être légitimement fière d'avoir donné sa place à la recherche scientifique dans ce grand oeuvre que constitue le nouvel aéroport de Roissy-en-France. De plus, la vaste expérience

des chantiers que possèdaient MM. LORIN, WEPIERRE et CHANUT rendaient très fructueux les entretiens qu'ils m'accordèrent et dont je tiens à les remercier.

J'ai particulièrement apprécié l'accueil que j'ai reçu à la Société Mécasol qui m'a autorisé, avec l'accord des maîtres d'oeuvre, à consulter ses dossiers. Je lui suis reconnaissant d'avoir su établir cette collaboration, dans le meilleur esprit scientifique, entre le chercheur et les réalisateurs.

J'ai reçu de deux de ses ingénieurs, MM. GOUJON et THULLIER, le meilleur accueil et des conseils compétents. Qu'ils en soient remerciés ici.

Melle ARNAUD, du Centre de Géologie de l'Ingénieur, et M. LEROUX, du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, n'ont pas hésité à me consacrer de leur temps pour m'aider à observer mes échantillons au microscope électronique.

Les remarques de M. LAUTRIDOU, du Centre de Géomorphologie de l'Université de Caen, me furent précieuses et je n'aurai garde d'oublier M. DEVEUGHELE et tous les chercheurs du Centre de Géologie de l'Ingénieur qui ont contribué à la progression de ce travail.

Il m'est agréable enfin de citer M. ROEDERER, Mme MARQUETTE, M. SEGOND et M. AGAR pour la gentillesse avec laquelle ils ont participé à la mise en forme de ce document.

S O M M A I R E

		Pages.
I.	INTRODUCTION	
	A. Présentation et plan de l'étude.	2.
	B. Historique des recherches sur le loess	
	1/ Recherches géologiques	3.
	2/ Recherches géotechniques.	7.
II.	LE PLATEAU D'ORLY	
	A. Introduction géographique et géologique	9.
	B. Description de quelques coupes et morphologie	11.
	C. Les différentes zones de limon	
	1/ La zone de loess	17.
	2/ la zone de mélange	28.
	3/ la zone de surface - le lehm	35.
	D. Les conditions hydrologiques et climatiques	40.
	E. Conception des ouvrages : fondations et terrassements	42.
	F. Orly : conclusion et essai de reconstitution génétique.	54.

III. LE PLATEAU DE ROISSY.

A. Introduction géographique et géologique. 57.

B. Description de quelques coupes et morphologie 59.

C. Les différentes zones de limon.
1/ La zone de limon carbonaté 66.
2/ La zone de limon décarbonaté 71.
3/ La zone de surface - le lehm 75.
4/ La zone d'alluvions du thalweg de Mitry-Mory 78.

D. Conditions hydrologiques et climatiques. 82.

E. Conception des ouvrages : fondations et terrassements. 84.

F. Roissy : conclusion et essai de reconstitution génétique. 90.

IV. CORRELATIONS ENTRE CARAC TERISTIQUES ET PROPRIETES.

A. La plasticité 93.

B. La perméabilité 96.

C. La résistance à la compression simple 97.

D. La compressibilité 100.

E. Conclusions. 105.

V. CONCLUSIONS GENERALES. 106.

VI. ANNEXES Pages.

Annexe 1 : situation des échantillons sur le plateau d'Orly 110.

Annexe 2 : Situation des échantillons sur le plateau de Roissy 113.

Annexe 3 : Rappels sur les essais géotechniques. 117.

VII. BIBLIOGRAPHIE. 120.

VIII. PHOTOS ET TABLEAUX. 139.

I

INTRODUCTION

I. INTRODUCTION

A. PRESENTATION ET PLAN DE L'ETUDE

Le terme "limon de plateau" désigne un "complexe" de formations résiduelles, de cailloutis, de limons proprement dit et de paléosols et sols formés sur ces derniers. Le loess qui en constitue la majeure partie et dont l'extension est considérable dans tout l'hémisphère Nord, a suscité et suscite encore l'intérêt des chercheurs de nombreuses disciplines. Formation quaternaire, elle est, en effet, contemporaine de l'homme et les préhistoriens en étudient la stratigraphie. Dépôt péroglaciaire, son influence sur le modelé du relief des régions tempérées actuelles provoqua les recherches de nombreux géomorphologues. Formation superficielle, le sol qui y prit naissance est une des plus riches terres de culture et son étude entre tout naturellement dans le cadre de la pédologie. Enfin, les hypothèses sur son origine donnèrent lieu à des controverses passionnées entre géologues, avant que ne soit admis son caractère éolien.

Par ailleurs, le premier terrain rencontré dans de nombreux travaux de génie civil et de bâtiments devait intéresser les mécaniciens des sols et les géotechniciens. Ces derniers, au cours de leurs travaux, s'apercevaient de l'utilité de synthèses réunissant les caractéristiques géologiques et les propriétés géotechniques. C'est dans cette optique de recherche orientée que fut conduit ce travail sur les limons de plateaux de la région parisienne.

Plan de l'étude.

D'importants travaux (Aéroport de Paris-Orly, Halles de Rungis, Aéroport de Paris-Nord) ont affecté les limons de deux plateaux

de la région parisienne, celui d'Orly et celui de Roissy. Je pouvais disposer d'un nombre élevé de sondages et de résultats d'essais géotechniques en ces lieux. Ce facteur indispensable à la représentativité des propriétés m'a conduit à limiter mon travail à ces deux plateaux. Pour chacun d'entre eux, le plan de l'étude est analogue. Après une première partie situant le cadre géographique et géologique du dépôt, j'ai réalisé, à l'aide de relevés de coupes de sondages, une carte d'épaisseur du limon et une carte de nature du substratum. Je poursuis par la description de quelques coupes type faisant apparaitre différentes catégories de limon. Chacune d'entre elles fait l'objet d'une étude pétrographique comprenant la granulométrie, la composition minéralogique et la structure et d'une étude géotechnique (plasticité, perméabilité, compressibilité et résistance). Quelques particularités du dépôt sont, à cette occasion, mises en évidence (concrétions de calcite, problème de l'affaissement). Ces analyses me conduisent à deux conclusions :l'une s'attache à l'aspect appliqué (fondations et terrassements) ; l'autre, d'esprit plus fondamental, est orientée vers une reconstitution génétique. Enfin, la dernière étape de ce travail est une comparaison des résultats obtenus sur les deux plateaux. Des corrélations géologie-propriétés géotechniques en constituent le fondement.

B. HISTORIQUE DES RECHERCHES SUR LE LOESS.

1/ Recherches géologiques.

La région parisienne, comme le témoigne l'extension des "limons de plateaux" en Europe, se situe à la limite sud de ces dépôts. L'épaisseur y est faible et les remaniements, postérieurs au premier dépôt, ont souvent modifié presque totalement le faciès d'origine. C'est pourquoi les études les plus fructueuses se développèrent dans les parties Nord et Ouest du Bassin Parisien (Picardie, Normandie) où les dépôts, plus importants et moins remaniés, permirent les premières distinctions, puis les classifications et, plus tard, le rattachement aux différentes périodes glaciaires.

Cependant, grâce à quelques coupes remarquables (Villejuif, Ivry) dans les environs de Paris, les limons de cette région purent être comparés à ceux précédemment distingués. Ainsi, J. LADRIERE (1890) ayant établi une classification dans le Nord de la France, la retrouve dans une coupe à Villejuif. Cette coupe (Carrière de Soudin) devait d'ailleurs faire l'objet de très nombreuses études :

- celle de A. LAVILLE (1904) qui comprenait une étudepaléontologique et préhistorique, ouvrant ainsi la voie aux préhistoriens qui jouèrent et jouent encore un si grand rôle dans l'établissement de la stratigraphie des loess de la région.
- celle de V. CLERMONT (1912) qui compara les différents niveaux à ceux qu'il avait reconnus dans la Somme.
- enfin celle de L. CAYEUX (1922) qui, en découvrant des foraminifères de la craie dans l'"ergeron" de Villejuif, apporta un élément décisif au débat sur l'origine du loess dans cette région.

En effet, tandis que se déroulaient ces premières études régionales, une controverse passionnée s'était établie entre partisans de l'origine éolienne et partisans de l'origine fluviatile du loess. L'hypothèse d'une origine marine soutenue par N. de MERCEY (1865) avait, en effet, été vite abandonnée. C'est le baron de RICHTOFEN (1877) qui, le premier, en découvrant des foraminifères de la craie dans le loess rhénan et par comparaison avec des dépôts semblables de Chine, proposa l'origine éolienne. Sa théorie s'appuyait sur les points suivants :

- homogénéité de la composition,
- indépendance de la distribution du loess vis à vis de l'altitude et morphologie particulière des dépôts,
- absence complète de stratification,
- présence de fossiles, soit d'origine lointaine, soit exclusivement terrestres.

De nombreux géologues cependant (H. HOWORTH 1882 - H. DOUVILLE 1910) contestèrent encore longtemps cette explication, alléguant en particulier que la stratification de type dunaire entrecroisée n'existait

pas. Bien que certains arguments de RICHTOFEN furent plus tard réfutés avec raison, son hypothèse fut admise à partir des années 1930, quand commencèrent à se développer les études sédimentologiques et pétrographiques précises.

A la suite de L. CAYEUX, en effet, V. AGAFONOFF et V. MALYCHEFF (1929) entreprirent la première étude synthétique du loess de Villejuif. Des analyses granulométriques et chimiques leur permirent de définir avec précision le loess. La décalcification de la partie supérieure (lehm), les différents types de concrétions et la morphologie des dépôts furent également étudiés. Quelques années plus tard, V. MALYCHEFF (1937) complétait ce travail en déterminant la composition minéralogique de la fraction argileuse (Montmorillonite et Beidellite avec des traces de Kaolinite). Ils abordèrent ainsi la plupart des disciplines qui allaient dorénavant apporter leur contribution à létude du loess : la sédimentologie, la pédologie et la gémorphologie. L'archéologie, de son côté, continuera d'être l'une des disciplines fondamentales pour la connaissance de ces dépôts.

La sédimentologie s'orienta dans deux directions principales : l'étude de l'influence du substratum et celle des remaniements.

Les minéraux lourds étudiés par S. DUPLAIX et H. MALTERRE (1946) puis par de nombreux autres chercheurs permettra de distinguer des provinces pétrographiques et d'établir que les associations minéralogiques du loess ne sont pas celles du substratum : le loess n'est pas un résidu d'altération. H. MALTERRE (1946) indique que la proportion de sable dans le loess près des buttes témoins n'est pas négligeable et qu'elle est proportionnelle à la distance à la butte sableuse. Il différencie également les limons et les loess par leur granulométrie. Le critère sera repris par F. BORDES (1952) et A. CAILLEUX (1953) pour étudier et distinguer les remaniements du loess.

Cependant, les études stratigraphiques se précisant, F.BOURLIER et J. GRAINDOR (1950),F. BORDES (1954), A. CAILLEUX (1953) en

vinrent à utiliser trois critères essentiels :

- les "cailloutis" de base,
- la présence d'industries préhistoriques bien définies,
- les paléosols caractéristiques d'une phase d'altération après dépôt.

La pédologie prenait ainsi un rôle capital.

Celle-ci permit, en effet, la distinction des paléosols et sols actuels sur limons. Elle fournit, d'autre part, des renseignements sur les conditions climatiques qui purent leur donner naissance. Les travaux de B. BRAJNIKOV (1942), R. DUDAL (1952), N. FEDOROFF (1969) M. JAMAGNE (1964) R. MONTURIOL et D. GALLARDO (1969) furent, dans ce domaine, déterminants.

Enfin, la géomorphologie apporta sa contribution par l'étude de la position et de la forme des dépôts et surtout par les remarquables observations et conclusions sur les actions périglaciaires. En effet, parallèlement aux observations dans les régions périglaciaires actuelles et grâce à A. CAILLEUX (1937, 1938, 1962, 1967), G. MAZENOT (1957), J. TRICART (1962, 1965, 1966), JP MICHEL (1965, 1966, 1972) F. BORDES (1950), JM AVENARD (1960), on apprenait à reconnaître et à comprendre les phénomènes fossiles de cryoturbation et de solifluxion dans le Bassin Parisien. Des reconstituions paléoclimatiques devenaient possibles (JP LAUTRIDOU, 1967).

Tandis que s'affinait ainsi la connaissance du loess grâce à ces différentes disciplines, quelques grands chercheurs réalisèrent de remarquables synthèses : A. CAILLEUX (1953), F. BORDES (1954).

Actuellement, outre les limons présumés du DONAU, on a pu identifier des limons du Günz, du Mindel, du Riss et du Würm. Ces derniers représentent la grande majorité des dépôts de la région parisienne. Leur stratigraphie établie par F. BORDES (1954) peut être résumée de la façon suivante (de bas en haut) :

- un loess (I) légèrement humidifié dans sa masse et recouvert par un lehm brun (interstade de Borup vers - 55000),
- un loess (II) bien typique, cryoturbé. Le lehm qui le recouvre est attribué à l'interstade du Laufern, vers - 35000,
- enfin, un loess récent supérieur, souvent poudreux, de teinte claire, qui fut "lehmifié" pendant l'interstade de Lascaux (- 15000) mais surtout pendant la période post-glaciaire (formation de la "terre à brique"). Les sols bruns lessivés et les sols lessivés constituent le profil "normal" sur les loess du cycle récent dans ce secteur climatique. La phase de "lehmification" antérieure à l'évolution pédologique jusqu'au sol brun, est caractérisée par l'altération minéralogique.

Dans la plupart des pays ou le loess est présent, se poursuivirent également des études théoriques fondamentales qui furent complétées par des études géotechniques précises.

2/ Recherches géotechniques.

La plupart des recherches géotechniques sur le loess se sont orientées vers l'étude de la relation structure-résistance.

Ainsi, dès le début, apparut une propriété remarquable du loess. Bien que tenant en talus verticaux, il s'effondre à saturation, entrainant parfois des désordres dans les bâtiments et les ouvrages de génie civil. Une étude de TERZAGHI (1950) montre l'importance de ce phénomène :

Afin de matérialiser l'effet d'un canal non étanche sur une couche de loess de 25m d'épaisseur au sud du Turkestan, TERZAGHI fit creuser un bassin de 10 x 20m et de 4m de profondeur : 3m d'eau y furent maintenus pendant 6 semaines. A la fin de cette période, le fond s'était affaissé de 0,75m et le bassin s'était élargi de 6m de chaque côté. A quelques kilomètres de là, des talus verticaux taillés depuis plusieurs centaines d'années subsistaient. L'ampleur du phénomène fut également établie par de nombreux autres travaux, aux Etats-Unis -

(TURNBULL, 1948), en URSS et en Tchécoslovaquie (FEDA, 1966). Diverses études en laboratoire semblent prouver que l'affaissement est dû à la rupture des ponts argileux qui constituent le ciment de la structure granulaire. Il convient de distinguer ce phénomène des cavités ou pseudo-karsts que des circulations d'eau à fort débit peuvent créer à l'intérieur du dépôt loessique et dont l'effondrement entraine le loess sus-jacent. Ce dernier phénomène, à la différence de l'affaissement structural, n'affecte, en général, que les versants. Bien que le critère d'affaissement de FEDA (Cf. § IV D) semble actuellement confirmé, plusieurs caractères de ce phénomène (rôle de la percolation, vitesse d'affaissement) sont encore mal connus et font l'objet de nombreuses recherches.

Une autre conséquence de la structure particulière du loess est la "pression de consolidation" qui résulte des essais de compressibilité à l'oedomètre. Elle est, anormalement supérieure au poids des terres sus-jacentes (KRINITZSKY et TURNBULL, 1966). Deux hypothèses sont émises pour l'expliquer, l'une faisant appel à des cycles mouillage-assèchement en surface, l'autre retenant la possibilité d'un ciment à base de calcite et de silicate et d'aluminate de calcium hydraté.

Enfin, la plasticité du loess entrainant souvent un terrassement difficile, une solution élégante fut mise en oeuvre : le traitement par la chaux. Si celui-ci n'est pas spécifique aux limons, il a cependant connu un développement considérable pour l'amélioration du compactage de cette formation. Particulièrement bien étudié aux Etats-Unis, il a, depuis peu, fait son apparition en France, et en particulier sur le chantier de l'aéroport de Paris-Nord.

II

LE PLATEAU D'ORLY

II. LE PLATEAU D'ORLY

A. INTRODUCTION GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE (Cf carte)

Le plateau d'Orly débute à environ 5 kms au Sud de Paris. Il est limité par trois vallées : à l'Ouest, celle de la Bièvre, à l'Est celle de la Seine et au Sud, celle de l'Yvette. Sa forme est grossièrement celle d'un trapèze de hauteur 15 km, les bases ayant respectivement et environ 10 km au Sud et 4 km au Nord. C'est une table plane autour de la côte NGF 90,0, limitée par des versants de pente assez forte vers les vallées aux côtes NGF 30 à 35 pour la Seine, 50 pour la Bièvre et 40 pour l'Yvette. Le relief est marqué par deux buttes sableuses au Sud-Ouest, culminant à la côte NGF 100,0 (butte de Champlan et butte du Tartre) et par l'entaille Est-Ouest du ruisseau de Rungis sur la moitié de la largeur du plateau.

Les zones habitées se situent au Nord (Villejuif, Vitry, Thiais) et le long des vallées (Villeneuve, Juvisy-sur-Orge, Longjumeau, Massy, Fresnes). Deux zones ont fait l'objet de travaux de génie vivil d'une grande importance pour l'implantation de l'Aéroport de Paris au Sud et des Halles de Rungis au centre du plateau.

Géologie.

Le plateau d'Orly est presque tout entier couvert par la carte géologique Corbeil au 1/50000, seule la partie nord figure sur la carte Paris au 1/50000.

La succession des couches est la suivante, de haut en bas :

- le limon des plateaux qui fait l'objet de mon étude, recouvre la plus grande partie du plateau.
- le sable de Fontainebleau, affleurant surtout au Sud-Ouest, constitue les buttes de Champlan et du Tartre. On le trouve également

de même que les marnes à huitres, à l'état de lambeaux sur le calcaire de Brie,

- le calcaire de Brie, constitué de marnes blanchâtres, passant à des calcaires plus compacts et à des travertins se changeant parfois en meulière compacte,
- les marnes vertes.

La structure est à peu près monoclinale, le pendage des couches, assez faible, est dirigé vers le Sud-Est.

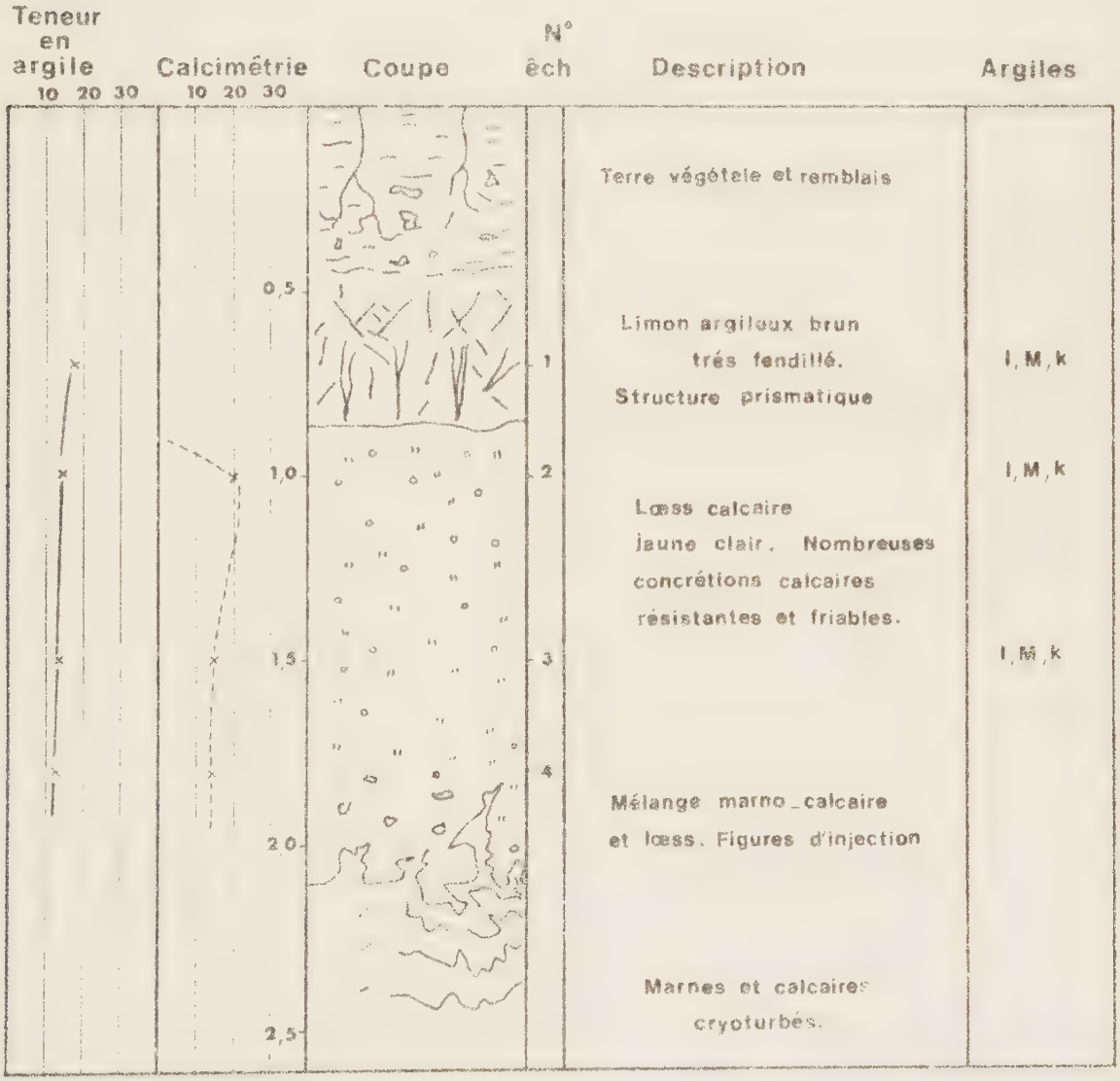
Le tableau 1 réunit la désignation de ces formations, leur position dans l'échelle stratigraphique et les notations sur la carte au 1/50000.

B. DESCRIPTION DE QUELQUES COUPES ET MORPHOLOGIE

1/ Description de quelques coupes sur le plateau.

Coupe 1 :

Elle se situe sur la commune de Chevilly-la-Rue, vers le centre du plateau (x = 600.125, y = 118.700). Elle fut mise à jour à l'occasion de travaux pour la réalisation du centre scolaire Pasteur.

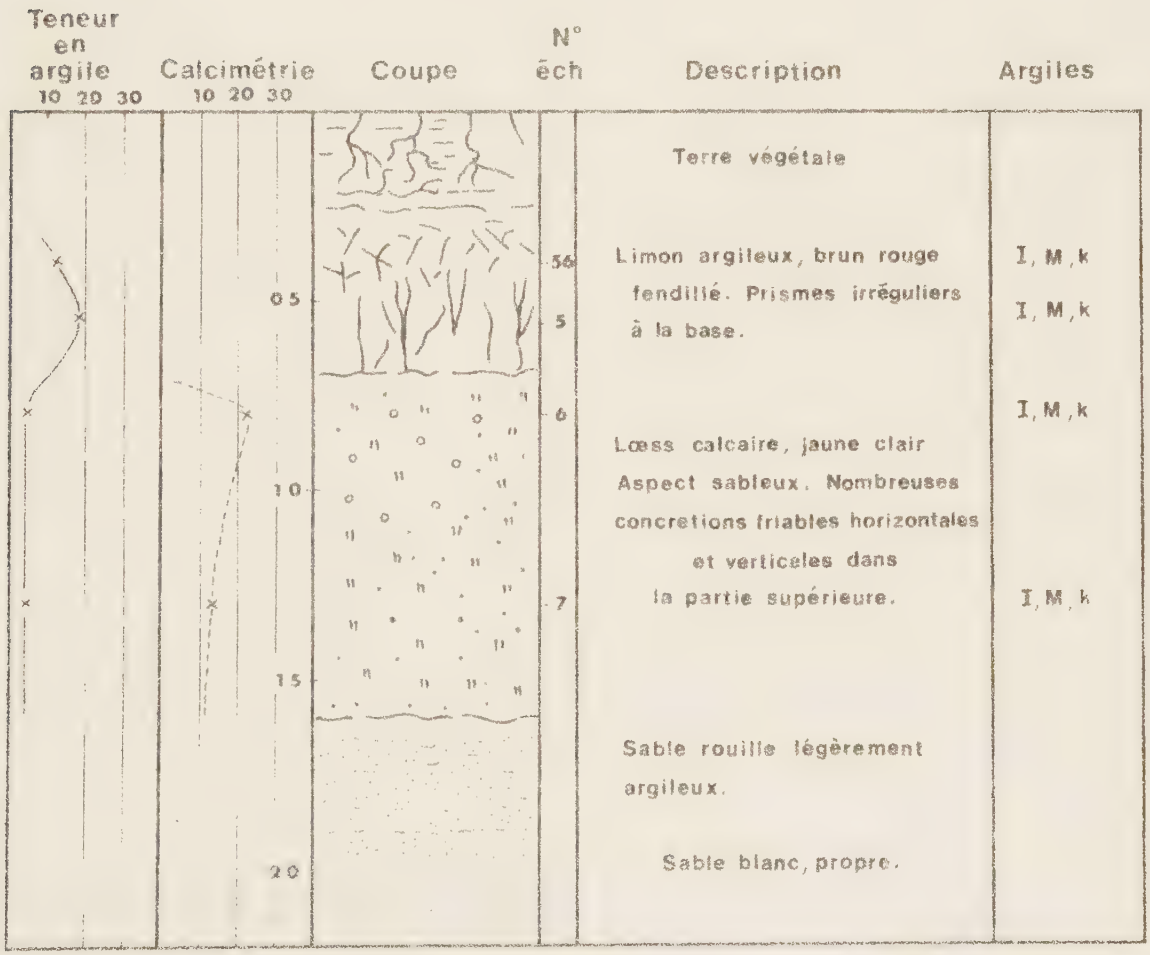


I : ILLITE - M : MONTMORILLONITE - k : KAOLINITE - IM : INTERSTRATIFIES -

Coupe 2 :

Elle est située sur la commune de Chilly-Mazarin, sur la route de Longjumeau, au Sud du carrefour des "Quatre-fourchettes" (x = 597.200, y = 111.800). Le limon constitue ici la découverte d'une carrière de sable en exploitation.

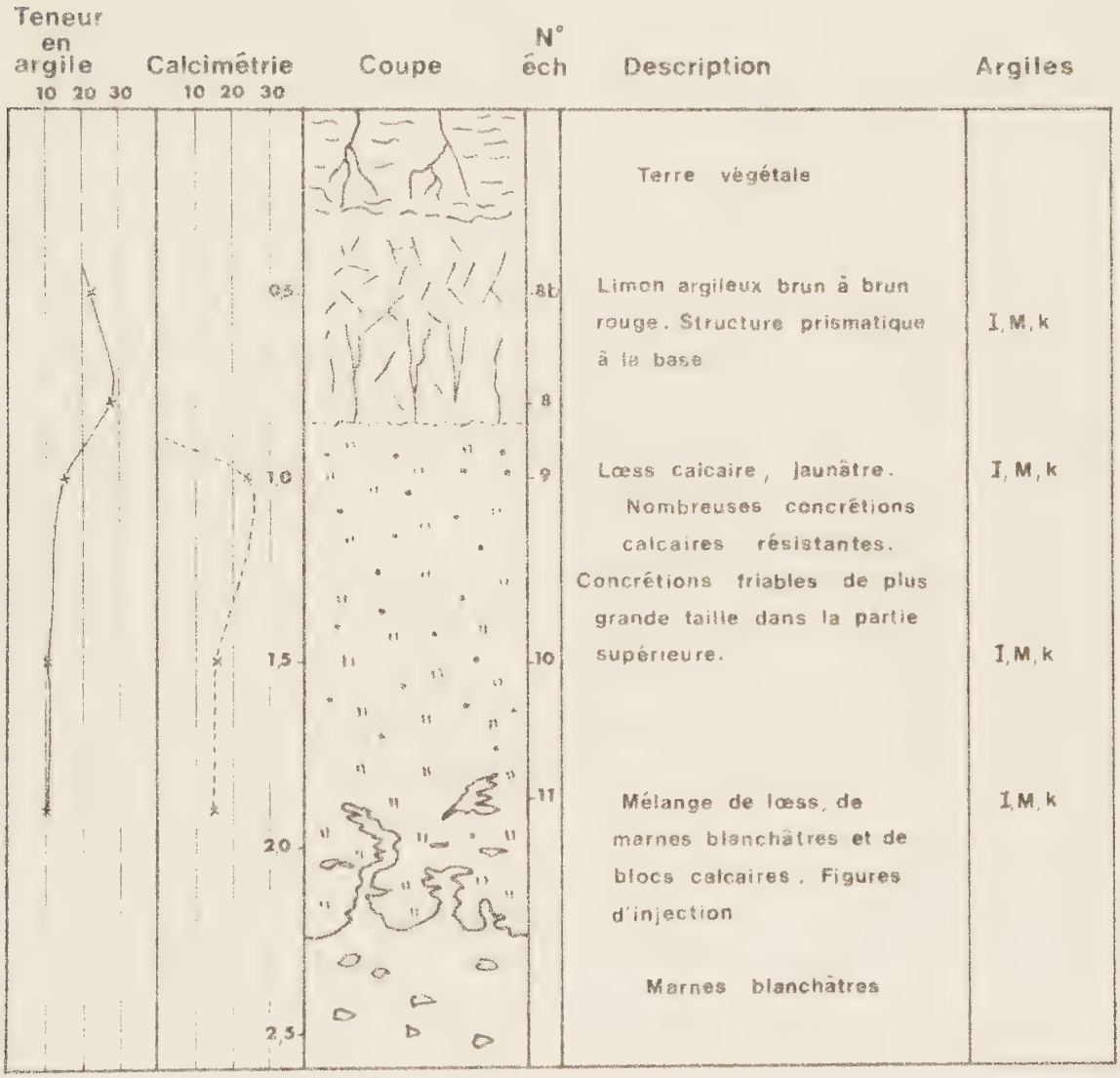
Cette coupe est située sur le versant est de la butte de sable. Sur le versant ouest, l'épaisseur du limon est beaucoup plus réduite (environ 25 cm), la couche de loess calcaire devenant inexistante.



I : ILLITE _ M : MONTMORILLONITE _ k : KAOLINITE _ IM : INTERSTRATIFIES _

Coupe 3 :

Elle est située sur le talus Nord de la N 186, exactement à l'angle sud-ouest du cimetière de Thiais (x = 602.875, y = 117.010)



I : ILLITE _ M : MONTMORILLONITE _ k : KAOLINITE _ IM : INTERSTRATIFIES _

Je n'ai retenu ici que trois coupes types dans le limon de plateau. D'autres coupes établies par moi-même ou par des géologues à l'occasion de travaux de génie civil (R. SOYER pour le collecteur de Rungis, en particulier) sont analogues.

On peut ainsi diviser verticalement le limon en trois grandes zones d'aspect très différent et dont, nous le verrons, les caractéristiques et les propriétés géotechniques seront également très différenciées.

Soit, de haut en bas, sous la terre végétale :

- une zone de limon argileux brun-rouge, complètement décarbonaté, comportant souvent une structure polyédrique et de nombreux débris de racines. Son épaisseur est en moyenne de 0,4 à 0,6m. Elle peut atteindre 1,0 à 1,3m, être complètement absente ou être mélangée aux remblais récents. Sa limite avec la zone suivante est souvent très nette et horizontale. Elle présente l'aspect d'un sol d'altération avec accumulation d'argileet structure polyédrique (sol brun lessivé, sol lessivé). C'est la couche communément appelée "lehm" ;
- une zone de loess calcaire, jaune clair, plus ou moins sableux selon les régions, comportant de nombreuses petites concrétions calcaires. Son épaisseur peut atteindre 4 à 5m. Le passage à la zone inférieure est très progressif ;
- une zone de mélange du loess et de la couche sous-jacente. Elle n'est pas décelable à l'oeil nu, quand le substratum est sableux, mais peut atteindre 2 à 3m sur le calcaire de Brie quand celui-ci présente son faciès d'argile à meulière ou de marnes.

On se trouve donc en présence d'un dépôt loessique calcaire dont la partie supérieure et la partie inférieure sont modifiées respectivement par altération et par mélange avec le substratum

J'étudierai donc les trois zones dans l'ordre suivant :

- le loess proprement dit, non modifié,
- sa modification par mélange avec le substratum,
- son altération dans la partie supérieure.

Avant de débuter l'étude détaillée, je décrirai la morphologie du dépôt limoneux pris comme un ensemble.

2/ Morphologie du dépôt.

Grâce aux nombreux travaux effectués sur le plateau, et en particulier sur le site de l'Aéroport d'Orly et du marché-gare de Rungis, j'ai pu disposer d'une documentation importante (plus de 300 coupes de sondages traversant le loess).

J'ai pu également, à l'occasion d'autres travaux de moindre importance, ou d'exploitations de carrières, relever moi-même des coupes dont les trois citées ci-dessus.

Les résultats sur la morphologie du dépôt sont résumés en une carte d'épaisseur du limon, une carte du substratum et deux coupes (tableaux 2 et 3).

La réalisation de la carte d'épaisseur appelle des remarques pour les deux points ci-dessous :

a) Indication des profondeurs ponctuelles.

La limite entre le dépôt loessique et le substratum est progressive et, par là, difficile à estimer. La profondeur indiquée pour les sondages est celle du substratum franc, c'est-à-dire sans traces de loess. Elle est naturellement plus précise pour une coupe, un sondage pouvant traverser précisément une figure d'injection et, par là, sous-estimer ou sur-estimer la profondeur du dépôt en ce point.

b) Tracé des isopaques.

La densité de sondage est très différente selon les zones : la précision est donc également variable. C'est pourquoi j'ai retenu deux types de tracés. Le trait plein pour les épaisseurs sures, le pointillé pour les épaisseurs seulement estimées.

Malgré ces quelques restrictions, quelques renseignements peuvent être tirés de cette carte :

- en moyenne, l'épaisseur du limon est croissante de l'W-S-W vers l'E-N-E. La zone d'épaisseur supérieure à 3m formant une bande dans la partie est du plateau, allant s'élargissant du Nord vers le Sud. Les épaisseurs maximales (7 à 8m) se rencontrent vers Villeneuve-le-Roi et au début du versant sur la Seine.
- le versant ouest du plateau en est pratiquement dépourvu, alors que le versant est, au contraire, en comprend des épaisseurs importantes.
- le limon semble avoir comblé de façon plus ou moins complète toutes les dépressions à l'est des buttes qui jalonnent la bordure occidentale du plateau. Il semble, d'autre part, se déposer de façon préférentielle sur les versants de ces dépressions qui regardent vers l'Est. Ceci apparait sur les coupes E - W (tableau 2 et 3).

En conclusion, la direction W - S - W, E - N - E semble constituer une direction privilégiée pour le dépôt , tant sur le plateau qu'au voisinage des dénivélations (butte de sable, versant de la Seine).

C. LES DIFFERENTES ZONES DE LIMON.

1) La zone de loess.

Le loess est homogène sur tout le plateau. Il est non lité, calcaire, jaune clair, plus ou moins sableux selon les régions. Il comporte de nombreuses concrétions calcaires de tailles variées, mais pouvant se rattacher à deux types principaux :

Type I : petites concrétions, très résistantes, en forme de tubulures (photo nº 1) de longueur millimétrique à centimétrique au plus et de diamètre de l'ordre de 1 à 5 mm.

Type II : Concrétions friables, plus importantes (diamètre atteignant 1cm et longueur maximale 8cm) comportant souvent en leur centre des débris de racines non décomposées (photo nº 2 et 3).

De nombreux talus verticaux creusés il y a plusieurs années, à l'occasion de travaux routiers, n'ont subi aucun affaissement ni éboulement. On note seulement sur la surface du talus l'existence d'une fine pellicule blanche de calcite qui recouvre toute la hauteur (Villeneuve-le-Roi).

a) Etude pétrographique.

1- Granulométrie.

Je n'ai rassemblé dans le tableau 4 que les courbes obtenues par la méthode du "bac Rivière", la plus précise. Celles obtenues au densimètre pour les chantiers de travaux publics leur sont très semblables dans le domaine où elles sont valables, c'est-à-dire pourles fractions supérieures à 2µ .

L'étude de ces courbes permet les constatations suivantes :

- le fuseau granulométrique est étroit, le loess est homogène,
- la forme de la courbe est très caractéristique. Sa pente est forte entre 80 µ et 10 µ (80% des grains ont un diamètre compris entre ces deux valeurs). Elle devient ensuite assez brusquement plus faible. Le pourcentage d'argile varie de 9 à 13%.

Les résultats obtenus, placés sur un diagramme triangulaire (EDELMANN, CAILLEUX, tableau 4 5) se situent incontestablement dans la catégorie des loess.

Hormis cette conclusion, la courbe granulométrique nous permet, dans une certaine mesure (CAQUOT.A, KERISEL J. 1966), de prévoir la sensibilité du loess au gel. Celle-ci est très forte, ce qui s'accorde bien avec les nombreuses observations de formation de lentilles de glace par ségrégation, qui sont à l'origine de nombreux désordres dans le limon des plateaux. C'est également à cette forte sensibilité que l'on doit d'importance des remaniements par le gel pendant la dernière période froide : cryoturbation (injection, cailloux dressés ...) et peut être la formation des mares briardes (d'anciens "pingos" d'après A. CAILLEUX).

2- Composition minéralogique

Les analyses globales aux rayons X de loess "tel quel" (tableau 6) donnent pour le loess la composition suivante :

- quartz
- calcite
- argiles,
- minéraux accessoires (feldspath, micas, gypse, minéraux lourds)

Le quartz.

Tous les grains de quartz sont recouverts d'une fine pellicule d'argile. Cependant, après tamisage en voie humide, ils peuvent bien être observés à la loupe binoculaire. Ils sont anguleux, à arêtes vives,

blancs et transparents dans leur grande majorité. Il existe cependant quelques "ronds mats" parmi ceux de plus grande taille. L'étude à la loupe binoculaire ne permet aucune conclusion sur le mode de transport des grains de quartz, étant donné leurs faibles dimensions.

En lame mince, ils apparaissent dispersés dans toute la masse de façon isotrope, sans accumulation remarquable. Quelques uns sont inclus dans les tubulures de calcite.

La calcite apparait sous trois formes :
- des grains disséminés,
- des concrétions,
- des fossiles.

- Les grains isolés sont rares, de petite taille, anguleux, à arêtes vives et recouverts d'argile. Il existe également quelques grains de taille plus importante, ronds, composés de craie typique à pâte très fine.

- les concrétions :

Le type I (concrétions résistantes) se présente sous forme de tubulures creuses, à une ou plusieurs branches (photo nº 1). Des coupes perpendiculaires à l'axe des tubulures révèlent une disposition en anneaux concentriques. Autour du trou central, nous trouvons respectivement :
. une zone interne de calcite blanche, transparente bien cristallisée, avec parfois, de petites fibres visibles à la loupe binoculaire,
. une zone moyenne de calcite jaunâtre, mal cristallisée, mammelonnée,
. une zone externe de calcite jaunâtre à brunâtre, opaque, mammelonnée, contenant souvent des grains de quartz et d'autres minéraux (limonite, feldspath).

Les deux dernières zones, analysées aux rayons X comprennent, outre la calcite, de faibles proportions d'argile.

Le type II : ce sont des concrétions d'aspect poudreux, d'un blanc vif, de formes très variées ;-tubulures de grande taille, comprenant en leur centre des débris de racines non décomposées

-petits amas de taille concentrique à millimétrique, avec ou sans débris de racines, disséminés dans toute la masse,

-dépôts millimétriques à aspect de pseudo-mycelium.

L'examen de ces concrétions au microscope électronique a révélé un aspect assez inattendu de leur cristallisation.

En effet, elles contiennent toujours des enchevêtrements de fibres de taille et d'aspect variés qui, identifiés aux rayons X, se se sont révélés être de la calcite. Leur disposition générale peut être distinguée à partir du grossissement X200. Elle peut être :

- soit un plaquage sur une partie de la surface de l'échantillon (photo nº 4 et 5)
- soit un amas autour de débris végétaux (photo nº 7)
- soit un remplissage de cavités plus ou moins cylindriques (photo nº 6).

Elles apparaissent sous des formes assez variées :

- parfois des fibres très fines (0,3 µ), longues (jusqu'à 100 µ), assez souples, l'aspect général étant celui d'une chevelure ébouriffée (photo nº 7). C'est en général autour des débris végétaux et dans les remplissages de cavités que l'on rencontre cet enchevêtrement. A plus grande échelle, elles apparaissent, plates, à contour en dent de scie, très irrégulières, de largeur moyenne très variable. Certaines fibres, plus courtes, triangulaires, leur sont associées. Il -est difficile d'atteindre des grossissements importants car la métallisation est très irrégulière dans de tels amas.
- souvent des fibres plus larges (1 µ), moins longues (25 µ au maximum) plates et rigides, en forme de bâtonnets. Certaines ont des contours

très réguliers, même à des grossissements importants (X 3500 ou X 5000), leur surface est lisse ou semble parfois cannelée. D'autres sont plus irrégulières, à bordure dentelée ; elles présentent, au fort grossissement (X 10000) l'aspect d'un cylindre déchiré selon un plan passant par l'axe. Ces types de fibres existent surtout dans les plaquages, sans traces de végétaux visibles. Elles sont plus rapprochées entre elles que les fibres fines, les bâtonnets présentant l'aspect d'un tas d'allumettes en désordre (photo nº 8, 9, 10, 11, 12)

La limite des amas ou des plaquages de fibres est nette et il n'existe pas de passage continu avec diminution du nombre de fibres. Par contre, on observe tous les intermédiaires entre les fibres fines et souples et les fibres courtes et rigides. On découvre également, assez souvent, dans la masse du loess hors de ces zones privilégiées, de petits amas comportant 2 à 10 fibres au plus, en formes de bâtonnets, très courtes et mélangées avec l'argile avoisinante.

Conclusion sur les concrétions.

Leur formation semble liée à la présence d'une vie végétale. Le type I, répandu uniformément dans la masse, serait contemporain du dépôt, le type II correspondant à la pédogénèse holocène.

Plusieurs hypothèses peuvent être évoquées pour la cristallisation en fibres assez exceptionnelle pour de la calcite.

Ces fibres pourraient être des tubulures crés autour de fines radicelles, reproduisant ainsi le schéma valable à plus grande échelle. Ceci ne parait possible que pour les fibres en forme de cylindres déchirés. Pour les autres, l'absence totale de cavités centrales et leur forme plate et régulière semblent éliminer cette hypothèse.

On pourrait également invoquer un premier dépôt sous forme d'aragonite (en aiguilles ou en bâtonnets) suivi d'une pseudo-morphose en calcite. Les fibres régulières présentent en effet la forme cristalline

de l'aragonite que l'on peut rencontrer dans certaines roches calcaires. Celles-ci, cependant, sont en général disposées de façon régulière, en gerbes de cristaux accolés (remarque orale de M. LEROUX).

La croissance des fibres enchevêtrées à partir de cristaux peut également rappeler ces phénomènes exceptionnels mais bien connus des métallurgistes que constituent les whiskers. Une action chimique seule serait alors à leur origine.

Enfin, la forme de cette cristallisation se rapproche beaucoup de celle des Mondlishs. Ces dépôts successifs de calcite sur les parois de certaines grottes ont en effet des formes en aiguilles analogues à celles que j'ai observées. Cette dernière hypothèse me paraît la plus vraisemblable pour deux raisons :

- les mondlishs sont datés de la dernière glaciation et sont donc contemporains du loess,
- de plus, il a été prouvé que les bactéries en sont la cause et une telle activité biologique devait régner autour des racines présentes dans le loess.

Les argiles.

La fraction argileuse qui représente 9 à 13% du loess est de composition assez constante, d'un échantillon à un autre (tableau 7).

L'Illite, qui se présente toujours sous une forme très proche du mica représente 50 à 70% de la fraction argileuse. Le Kaolinite de 10 à 20%, et la Montmorillonite de 20 à 40%.

3- La structure du loess.

Les mesures de la densité sèche, de l'indice des vides et de la porosité de plus de 50 échantillons ont donné les résultats suivants :

		Extremes		Moyenne
d	densité sèche	1,51	1,73	1,62
E	indice des vides	0,80	0,59	0,67
n	Porosité	44,4	37,0	40,0

La porosité est remarquablement forte. Elle ne peut être expliqué par la seule présence des tubulures et correspond à une structure extrêmement aérée. Ceci est confirmé par l'étude en lame mince mais surtout par les observations au microscope électronique à balayage.

A cette échelle, le loess présente un aspect d'empilement de grains assez disjoints les uns des autres et de tailles variées (photo nº 13 et 14).

La surface des grains, observée au plus fort grossissement (X 2000) semble constituée d'argiles dont les extrêmités des plaquettes apparaissent en relief sur la surface. Ces particules empilées semblent orientées parallèlement à la surface du grain dans la plupart des cas, et en dehors des zones de contact des grains (photo nº 15 et 16).

Au niveau de ce contact, l'argile joue le rôle de "ponts" entre les grains. Il est cependant impossible de distinguer les types d'argiles et l'orientation des particules constituant cette liaison. La présence d'autres corps dans ces liaisons n'est pas décelable, hormis les petits paquets de fibres (Cf p 21), très courtes (1 µ), en petit nombre et mêlées assez souvent à l'argile. Elles ne semblent pas jouer un rôle fondamental, mais elles prouvent cependant, la présence de carbonates très divisés.

On attendrait d'une telle structure une très faible résistance à la compression. Au contraire, comme le prouvent les essais à l'oedomètre

(Cf § II, C 1, b, 3) cette résistance est forte, voire très forte.

L'association de ces deux résultats d'apparence contradictoire constitue l'une des caractéristiques des dépôts loessiques.

b) Etude géotechnique.

1/ Plasticité (limites d'Atterberg).

Le tableau suivant résume les résultats observés :

	Extremes		Moyenne
W_l	34,3	27,5	30,9
W_p	23,3	19,0	21,6
I_p	7,3	11,1	9,2

Comme le laissaient prévoir les études précédentes, l'homogénéité du loess conduit à des résultats groupés. Ils se situent sur la ligne "A" de Casagrande, au niveau des "limons et argiles organiques ou non" (Cf tableau 9).

L'activité colloïdale de l'argile ($\frac{I_p}{d_{2\mu}}$) vaut en moyenne 0,82. Je rappelle que l'activité de l'Illite est comprise entre 0,75 et 1,25, qu'elle peut atteindre 2,0 pour la Montmorillonite, et est légèrement inférieure à 0,75 pour la Kaolinite.

La teneur en eau à saturation, calculée avec l'indice des vides maximal, soit 0,8, est de 29,8%. Cette teneur est donc au maximum égale à la limite de liquidité. Pratiquement, cette limite ne

ne semble jamais atteinte, la teneur en eau naturelle dans le loess variant de 17 à 24%. Seule, la limite de plasticité est donc dépassée, mais ceci est suffisant pour entrainer en saison humide, certaines difficultés de terrassement.

2/ Perméabilité.

La présence de tubulures, pour la plupart verticales, entraine une anisotropie de perméabilité dans le loess (HOLTZ et GIBBS, 1951).

A Orly, le coefficient K vertical est environ 2 x 10-7 m/sec (Cf tableau 10). Un essai de perméabilité horizontale a donné le résultat suivant : $K = 4 \times 10^{-9}$ m/sec.

Les observations sur la structure (Cf § II, C 1, a, 3) permettent d'approfondir ces résultats. Il existe en fait deux échelles de perméabilité.

- la disposition des grains, liés par l'argile, crée des cheminements longs, étroits et sinueux à travers le loess. Certaines cavités peuvent même être complètement isolées (porosité fermée), soit naturellement, soit par un léger gonflement des liens argileux au moment de l'arrivée de l'eau. C'est cette perméabilité "intrinsèque" que l'on doit mesurer par le coefficient K horizontal. Elle doit être, de plus, isotrope.
- D'autre part, les tubulures, entourées de calcaire, constituent des cheminements préférentiels, moins sinueux, et de dimensions plus importantes que les précédents. Elles créent l'anisotropie et la forte perméabilité verticale.

L'imprégnation d'échantillons de petite taille par des résines en vue de la fabrication de lames minces confirme cette dualité. Les tubulures sont parfaitement et rapidement imprégnées, les pores, au contraire, le sont lentement et parfois même incomplètement.

3/ Les essais à l'oedomètre.

Les courbes obtenues à l'oedomètre sont très semblables d'allure. On y distingue deux branches nettes, au cours de la consolidation: une branche horizontale (peu de variation de l'indice des vides), puis une variation assez brutale à partir d'une pression donnée (Pc). D'autre part, la courbe en baisse de pression est presque horizontale, révélant un indice de gonflement (Ig) très faible (tableau 11 et 12).

La pression de consolidation Pc varie de 1,5 à 2,8 bar.

Ces valeurs sont considérables pour un sol aussi poreux et, dans tous les cas, supérieures au poids des terres actuellement susjacentes au loess. En effet, un échantillon prélevé à 5m de profondeur, ce qui est un maximum dans notre cas, devrait avoir une pression de consolidation de l'ordre de 0,8 bar au maximum.

L'indice de compression C_c, caractéristique de la compressibilité du matériau, varie de 0,300 à 0,126. Cet indice qui serait peu élevé pour une argile, est nettement supérieur à la moyenne de ceux obtenus pour un silt.

D'autre part, l'indice de tassement instantané qui décroit quand l'indice des vides diminue, demeure très élevé (encore 50% pour des pressions supérieures à 5 bar). Le tassement primaire étant également rapide et important, la conclusion pratique est la suivante : la pression de consolidation P_c dépassée, le tassement à prévoir se fera très rapidement dès l'application des charges.

L'indice de gonflement est pratiquement nul, aucun gonflement ne sera donc à craindre.

4/ Résistance à la compression simple.

Le tableau 13 résume les valeurs de R_c et sa variation en fonction de la teneur en eau. Celle-ci prouve, s'il en était besoin, le rôle fondamental des liens argileux dans la structure et la résistance du loess.

2/ La zone de mélange avec le substratum.

Presque toujours présente à la partie inférieure du dépôt loessique, cette zone est caractérisée par un mélange plus ou moins hétérogène du loess avec la couche sous-jacente. Les limites inférieures et supérieures de cette zone sont difficiles à déterminer car le passage est assez continu ; on peut cependant estimer son épaisseur de 0 à 2m au-dessus du substratum proprement dit.

Sur le plateau d'Orly, le substratum du loess est constitué de deux couches principales (voir carte du substratum) : dans la partie ouest et sud-ouest, le sable de Fontainebleau qui constitue les buttes de Champlan et du Tartre. Il s'étend sous le losse sur environ le tiers de la largeur du plateau. Dans la partie centrale et est, le calcaire de Brie qui peut présenter plusieurs faciès : marnes blanchâtres calcaires passant à des calcaires plus compacts et à des travertins avec, parfois, des meulières compactes.

Il existe enfin sur ce calcaire des lambeaux de sable de Fontainebleau et de marnes à huitres.

L'aspect de la zone de mélange est très différent selon le substratum :

- sur le marno-calcaire de Brie, la zone de mélange est bien visible : la limite supérieure du calcaire de Brie n'est pas horizontale, mais marquée d'involutions et de plications souvent très découpées. Le substratum est lui-même perturbé, les blocs disjoints et parfois déplacés sur une épaisseur de 2 à 3 m. Les figures ainsi dessinées révèlent incontestablement une cryoturbation intense (MAZENOT et CAILLEUX 1957) sans effets de solifluxion car la surface topographique est plane.
  La granulométrie du loess le rend en effet particulièrement sensible au gel, c'est-à-dire à la formation de lentilles de glace. Ainsi, au moment du regel, par le haut, du mollisol, sa base non

encore gelée se trouve soumise à des contraintes différentielles car elle repose sur le pergélisol qui constitue une assise dure. Pour certains auteurs, ceci explique l'injection des marnes de Brie à l'intérieur du loess. Les petits blocs injectés auraient une origine également liée au gel, mais légèrement différente (formation de glace sur la paroi froide : TRICART et CAILLEUX, 1967, HABIB, 1966).

- Sur le sable de Fontainebleau, la limite inférieure est très nette, horizontale et l'observation d'une coupe à l'oeil nu ne permet pas de distinguer de zone de mélange, si ce n'est une légère différence de couleur (légèrement plus claire) et d'aspect (plus sableux). Les analyses granulométriques révèleront un pourcentage plus important de sable. Cette zone de loess sableux est également présente autour des buttes, même quand le substratum est le calcaire de Brie. L'origine dans ce cas, n'est donc pas à attribuer à la cryoturbation, n'entrainant pas le sable, mais plus probablement à un mélange au moment du dépôt de poussières éoliennes avec le sable roulé sous l'action du vent. H.MALTERRE (1946) prélevant de nombreux échantillons autour de la butte de Champlan a bien mis en évidence la décroissance de la teneur en sable en fonction de la distance à la butte dans la direction ouest-est.
- enfin, sur les lambeaux de sable et de marnes à huitres, la zone de mélange comprend tous les constituants du substratum.

Remarque préliminaire à l'étude plus détaillée de la zone de mélange :

Selon le substratum, cette zone peut être divisée en deux classes :

- le mélange sable-loess assez homogène qui fera l'objet des même études que le loess stricto sensu ;
- le mélange marno-calcaire de Brie-loess constitué de deux phases différentes. Je n'étudierai que les modifications qu'entraine ce remaniement dans la phase loess. Quelques caractéristiques géo-

techniques du mélange, en tant que matériau, seront cependant citées (Cf § II, C, 2°, 2, a).

1- Le mélange sable-loess.

Les coupes montrent les mêmes caractéristiques que le loess stricto sensu, y compris les divers types de tubulures, la pente des talus et l'aspect homogène et non lité.

a) Etude pétrographique.

Les deux courbes (tableau 15), obtenues au bac Rivière sont représentatives de cette zone. Les autres courbes, obtenues au densimètre, pour les études de chantiers leur sont conformes. La forme de la courbe est la même que celle du loess stricto sensu, excepté la proportion d'éléments de taille supérieure à 100µ qui devient non négligeable (environ 10%). Au-delà de la zone à substratum sableux, cette proportion semble décroitre rapidement : il n'existe plus de fractions > 100µ décelables au tamis, mais en lame mince, des grains > 100µ apparaissent épars dans le loess et semblent étrangers à la masse des autres grains.

La composition minéralogique est la même que pour le loess stricto sensu (tableau 16 et 17). La structure observée au microscope électronique (relation entre grains, aspect des tubulures) est également la même. La porosité moyenne est légèrement plus élevée (41,5%) que celle du loess stricto sensu.

b) Etude géotechnique.

1. Plasticité (limites d'Atterberg).

15 mesures sur des échantillons de mélange sable-loess ont donné les résultats suivants :

	Extremes		Moyenne
W_l	30,6	29,1	30,0
W_p	20,3	18,5	19,5
I_p	8,8	6,0	7,5

Le pourcentage relativement plus faible d'argile est la cause de la légère différence de plasticité par rapport au loess stricto sensu. Le stade de la plasticité (W_p) n'est pratiquement jamais atteint aux teneurs en eau naturelles (15 à 20%). Ce mélangé étant d'autre part nettement moins plastique que le loess stricto sensu, les difficultés de terrassement sont donc moins grandes dans cette zone.

2. Essais à l'oedomètre.

La forme des courbes de consolidation est très semblable à celle du loess stricto sensu (tableau 18). La P_c et le coefficient C_c sont légèrement plus élevés ($2,0 \leq P_c \leq 3,5$; $0,110 \leq C_c \leq 0,301$) Le tassement instantané et primaire représente le même pourcentage du tassement total (tableau 19).

3. Résistance à la compression simple.

R_c est, à teneur en eau naturelle moyenne, plus forte que celle du loess stricto sensu, mais elle décroit plus rapidement quand la teneur en eau augmente (tableau 20).

Le mélange sable-loess est en fait un loess en place comportant seulement un apport de sable de Fontainebleau dont la seule action du point de vue des propriétés géotechniques est de diminuer la proportion relative d'argile.

2- Le mélange marno-calcaire de Brie-loess

La plupart des observations pétrographiques (granulométrie, minéralogie, densité) peuvent s'effectuer sur des échantillons de petite taille. L'hétérogénéité du mélange allant de l'échelle centimétrique à l'échelle métrique., il est donc possible d'étudier du point de vue pétrographique, les modifications de la phase loess- seule. Au contraire, les études géotechniques affectent des échantillons de plus grande taille et sont donc représentatives, dans une certaine mesure, des propriétés du mélange.

J'étudie donc, dans la partie pétrographique, la phase loess. Je cite ensuite quelques caractéristiques des marnes blanches sous-jacentes. La partie géotechnique est consacrée aux propriétés du mélange.

a) Etude pétrographique.

La phase loess : la granulométrie et la composition minéralogique (tableau 23 et 4) sont les mêmes que celles du loess sus-jacent (sableux ou stricto sensu). La différence considérable provient de la structure, les résultats de mesure de densité sont, en effet, les suivants :

	Extremes		Moyenne
d	1,71	1,92	1,75
e	0,58	0,40	0,54
n	36,7	28,6	35,2

La porosité est nettement plus faible. Le loess de cette zone a perdu sa structure aérée.

Quelques caractéristiques des marnes blanches.

La granulométrie est plus variable et plus étalée (tableau 24) que celle du loess. La densité en place est comprise entre 1,71 et 1,81 Les limites d'Atterberg sont très variables (de 2,6 à 27,1 pour l'indice de plasticité) et les courbes à l'oedomètre, très régulières et de forme caractéristique (tableau 25). Les marnes blanches sont peu compressibles.

b) Etude géotechnique.

1. Plasticité (limites d'Atterberg).

Elles varient avec le loess (sableux ou stricto sensu), la marne et la proportion de chacun d'eux. Les résultats très dispersés (tableau 26) indiquent seulement une augmentation sensible de l'indice de plasticité :

	Extremes		Moyenne
W_l	24,4	46,7	33,6
W_p	13,9	26,0	21,2
I_p	5,9	20,7	15,1

2. Essais à l'oedomètre.

Les courbes oedométriques sont très différentes de celles du loess. Elles ne sont plus composées de deux branches bien distinctes, mais d'une seule courbe (tableau 26) dont la pente varie de façon assez continue.

Il existe en fait une modification continue des courbes oedo-

métriques, la valeur d'identification étant l'indice des vides initial (tableau 28). Les termes extrêmes étant d'une part le loess et d'autre part les marnes blanches (tableau 25).

L'indice de compressibilité C_c encore mesurable, décroit avec l'indice des vides initial. Ce mélange est donc beaucoup moins compressible que le loess, mais ne possède plus de pression de consolidation P_c. Les tassements instantanés et primaires sont légèrement diminués.

3. Résistance à la compression simple.

Elle est, à teneur en eau égale, légèrement inférieure à celle du loess (tableau 29).

3/ La zone de surface : le lehm.

Parfaitement remarquable sur le terrain par sa couleur brun-rouge contrastant avec la couleur jaune clair du loess sous-jacent, cette couche est presque partout présente. Son épaisseur est en général de 0,6 à 0,8m. Elle peut cependant être absente, mélangée à des remblais ou atteindre parfois 1,4 à 1,5m.

Sous la terre végétale (brun-noire) c'est une zone de limon argileux brun à brun-rouge, à structure polyédrique, avec de nombreuses traces de racines et complètement décarbonatée. La teneur en eau y varie considérablement au cours de l'année : en saison sèche, la couche se débite en prismes verticaux à base polyédrique, très détachés les uns des autres. En saison humide, au contraire, l'aspect est continu, et parfois même cette couche s'écoule sur le loess sous-jacent. En général, la pente du talus est plus faible que celle du loess.

Cette zone se présente incontestablement comme l'horizon "B" d'un sol complètement lessivé ou brun-lessivé.

a) Etude pétrographique.

1. Granulométrie.

Elle est fonction de deux paramètres :
- la granulométrie du loess sous-jacent
- la profondeur.

La teneur du lehm en argile sera plus faible sur le loess sableux que sur le loess stricto sensu (tableau 30).

Cependant, la variation de la teneur en argile en fonction de la profondeur reste la même (coupe 2 et 3). Cette teneur croit

jusqu'à la profondeur de 0,8m environ, puis décroit très rapidement, la zone d'accumulation en argile est alors étroite et se trouve presqu'au contact de la zone calcaire.

Ces deux courbes sont des cas extrêmes, tous les intermédiaires semblant exister.

Hormis la teneur en argile, la forme des courbes se rapproche beaucoup de celles du loess sous-jacent. Remarquons seulement que même sur loess sableux, la fraction > 100µ est très réduite.

Les conclusions sur la sensibilité au gel sont les mêmes que pour le loess. Le lehm est très sensible au gel.

2. Composition minéralogique.

L'analyse aux rayons X (tableau 31) de six échantillons "tels quels" et une analyse chimique (tableau 32) établissent les différences suivantes avec le loess (tableau 6 et 8).

Le pourcentage de carbonate est très faible. Les oxydes de fer sont en proportion plus forte (4% contre 2% pour le loess), ce qui explique sans doute la différence de couleur. Ils n'apparaissent pas du tout aux rayons X, ce qui laisse penser qu'ils se trouvent très probablement sous forme de gel.

La fraction argileuse comprend les mêmes minéraux que le loess : Illite, Montmorillonite et Kaolinite en proportions très voisines. Il semble cependant exister un très faible pourcentage d'interstratifiés Illite-Montmorillonite (tableau 33).

3. La structure.

Dans la zone d'accumulation d'argiles (≃ 0,8m de profondeur)

les mesures de densités ont donné les résultats suivants :

	Extremes		Moyenne
d	1,54	1,66	1,58
e	0,753	0,628	0,712
n	43,0	38,6	41,6

La porosité est donc plus forte que celle du loess. Notons cependant que ces mesures sont une moyenne en saison sèche et en saison humide. Or, surtout pour la couche superficielle, la teneur en eau varie beaucoup ; le calcul de la porosité prend en compte, en saison sèche, les fentes de retrait, ce qui augmente sa valeur. Il n'en demeure pas moins que, contrairement aux résultats habituels sur les sols à horizon d'éccumulation, la densité n'augmente pas, mais se trouve réduite par rapport au terrain sous-jacent. Dans la zone de surface (de 0,2 à 0,6m environ) la porosité est encore plus grande :

	Extremes		Moyenne
d	1,58	1,43	1,49
e	0,71	0,89	0,81
n	41,5	47,0	44,7

Au microscope électronique à balayage, la structure du lehm apparait comme un amas de grains ennoyés dans une matrice argileuse (photo nº 17 et 18). La taille des pores est en moyenne nettement moins grande que celle du loess. Les grains semblent beaucoup plus liés. La porosité que les mesures révèlent plus forte que celle du loess, est donc constituée d'un nombre beaucoup plus élevé de pores de taille plus réduite. Cette disposition est sans doute à l'origine de la faible perméabilité du lehm (Cf § II,C,3º,b,2) qui aurait pu apparaitre contradictoire avec sa porosité très forte.

b) Etudes géotechniques.

1. Plasticité (limites d'Atterberg).

L'augmentation de la teneur en argile par rapport au loess entraine une augmentation de l'indice de plasticité.

	Extremes		Moyenne
W_l	34,7	46,6	42,1
W_p	12,5	24,0	18,2
I_p	17,6	30,0	24,0

L'activité colloïdale de l'argile est comprise entre 0,8 et 1,1 ce qui correspond à une argile normalement "active". Elle est cependant légèrement supérieure à celle de l'argile du loess. La faible proportion d'interstratifiés (Cf tableau 33) en est sans doute la cause.

La limite de liquidité peut être atteinte à saturation. La limite de plasticité, elle, est très souvent dépassée aux teneurs en eau naturelles. On conçoit que sur certains versants, la solifluxion ait pu affecter cette couche et combien, d'autre part, le travail de chantier est difficile en saison humide.

2. Perméabilité

Elle est en moyenne plus faible que celle du loess ($K = 10 \times 10^{-10}$ m/sec), malgré un indice des vides supérieur (tableau 34). La disparition des tubulures calcaires et la diminution de la taille des pores en sont la cause.

3. Essais à l'oedomètre.

Les courbes de consolidation ont exactement le même aspect que celles du loess (tableau 35).

La pression de concolidation P_c varie de 1,1 à 3,0 bar. L'indice de compressibilité C_c est compris entre 0,167 et 0,31 (tableau 36). Le lehm est donc fortement compressible. Les indices de tassement instantané et le tassement primaire sont élevés (60 à 70%), prouvant que le lehm, lui non plus, n'est pas saturé au moment de l'essai oedométrique.

L'indice de gonflement est pratiquement nul.

4. Résistance à la compression simple.

L'influence de la teneur en eau (tableau 37) est surtout sensible au dessous de 17% ; R_c peut ainsi atteindre 4 à 5 bar pour des teneurs de l'ordre de 16%, c'est-à-dire en saison sèche. En saison humide, elle décroit considérablement en devenant de l'ordre de 0,8 à 1,6 bar.

5. Essais au triaxial.

L'angle de frottement intergranulaire est plus faible que celui du loess (tableau 38 pour le lehm et tableau 14 pour le loess).

D. CONDITIONS HYDROLOGIQUES ET CLIMATIQUES.

1/ La nappe phréatique.

La première nappe que l'on rencontre est contenue dans la couche de calcaire de Brie, à sa base, et dans les couches de transition avec les marnes vertes. Elle est alimentée par les eaux d'infiltration qui s'écoulent vers les différentes vallées selon des voies difficiles à déterminer étant donné l'hétérogénéité des couches. Un grand nombre de sources ceinturent ainsi le plateau (Rungis, Villejuif, Villeneuve-le-Roi). Dans la partie ouest du plateau, le sable de Fontainebleau peut également contenir la partie supérieure de cette nappe.

Bien que son niveau soit sujet à des variations saisonnières importantes, elle n'affectera que rarement le limon sur le plateau proprement dit. Elle pourra, au contraire, l'atteindre sur les versants (à l'est du plateau) où elle constituera un danger considérable.

2/ Les teneurs en eau naturelles (W % nat.)

Elles varient en fonction de la saison, de la profondeur et du substratum :

- le lehm, en surface, a les plus grandes variations : W % prend des valeurs comprises entre 15,5 et 25%.
- sur le calcaire de Brie, le loess stricto sensu et le mélange ont des teneurs en eau comparables et varient de 17 à 25%.
- le loess sableux, sur substratum de sable de Fontainebleau, a des teneurs en eau légèrement inférieures, W variant de 15 à 20%.

3/ le gel.

Les observations fournies par la Météorologie Nationale sont

les suivantes : nombres moyens de jours de gelée à la surface du sol (relevé des thermomètres au parc St Maur pendant les années 1947 à 1951) :

janvier	: 22	juillet	: néant
février	: 19	août	: néant
mars	: 20	Septembre	: 1
avril	: 14	octobre	: 8
mai	: 2	novembre	: 16
juin	: néant	décembre	: 18

Total moyen annuel : 120

Notons cependant que l'amplitude des variations de température s'amortit rapidement dans le sol, surtout quand il est mauvais conducteur. Ainsi, la variation diurne à 0,10m de profondeur est de 2°33 dans un sol nu et de 0°54 seulement dans un sol gazonné (J.LEVINE).

Pendant les hivers les plus rigoureux (1879, 1963) la gelée a atteint la profondeur de 0,80m. C'est l'épaisseur moyenne de la couche de lehm.

E. CONCEPTION DES OUVRAGES : FONDATIONS ET TERRASSEMENTS.

Le premier chapitre est consacré aux fondations, c'est-à-dire à la recherche d'un sol de résistance suffisante pour fonder l'ouvrage. Seul cet aspect sera étudié. Le problème de la tenue de la fouille et des conditions de travail sur le chantier sera traitée au second chapitre (terrassements) qui comprendra également une étude sur les remblais.

1/ Les fondations.

J'envisagerai successivement les deux types principaux de fondations : - fondations pour constructions
- fondations pour chaussées.

a) Fondation pour constructions.

1. Principaux groupes.

Les études précédentes permettent de classer les différentes couches en trois groupes homogènes pour leurs propriétés de portance :

groupe 1 : lehm
groupe 2 : loess stricto sensu et loess sableux
groupe 3 : mélange loess et marno-calcaire de Brie.

Pour reconnaître ces trois groupes, les essais à faire sont limités :
- le lehm (groupe 1) et le loess (groupe 2) se distinguent facilement sur le terrain ou en carottes par simple observation à l'oeil nu. Déterminer la couche de mélange avec le calcaire de Brie (groupe 3) devra par contre, faire l'objet d'essais, car les différences de propriétés ne correspondent pas exactement avec le niveau visible de mélange. Pour

cela, la densité sèche me semble le critère à la fois le plus simple et le plus significatif. Ainsi, une description détaillée et précise des carottes de sondage, des coupes (puits, tranchées) et des essais de densité sèche assez précis permettent de distinguer et de situer les différents groupes. Il faut ensuite choisir les essais afin d'avoir l'idée la plus précise possible des propriétés de chacun d'entre eux.

2. Choix des échantillons et des essais.

Remarques préliminaires :

- aucun essai de portance ne se justifie sur le lehm.

Cette couche, en effet, est, en moyenne, sujette au gel sur toute son épaisseur. Les désordres qu'entraineraient un hiver rigoureux (lentilles de glace, tassements et gonflements différentiels, saturation possible au dégel) ne permettent pas de l'utiliser comme fondation.

- on ne peut baser un calcul sur des essais réalisés à teneur en eau faible.

La teneur en eau affecte, en effet, très profondément les propriétés de portance du limon (Cf § IV). Il faut donc estimer la valeur maximale de W % naturelle. Elle est de l'ordre de 25% sur le plateau mais chaque cas devra cependant faire l'objet d'une étude particulière (présence de lentilles imperméables dans le substratum, écoulement des eaux superficielles modifié par l'ouvrage, etc ...)

- Représentativité des essais de laboratoire.

. Le groupe 2 est un sol homogène. Les essais en laboratoire (sur échantillons de petite taille) sont donc représentatifs.

. Le groupe 3, au contraire, est un sol hétérogène. Si les marnes de Brie dans le mélange présentent des propriétés assez voisines du loess pourla portance, la présence de cailloux pourra entrainer des résultats très dispersés. Les essais in-situ sont donc conseillés.

Sinon on essaiera, dans la mesure du possible, de ne pas utiliser d'échantillons comprenant des petits blocs et cailloux.

- Le choix des Essais.

. Le taux de travail à long terme est calculé à partir de la cohésion intergranulaire (C') et de l'angle de frottement intergranulaire Φ' (mesurés au triaxial). Ce taux de travail est pratiquement toujours supérieur au taux à court terme.

. Le taux de travail à court terme :

- si aucune saturation n'est à craindre, ce taux sera déduit de la cohésion C_a et de l'angle de frottement Φ_a apparents.
  Ces mesures peuvent être réalisées :-au triaxial, c'est la meilleure mesure.
  -par la résistance à la compression simple R_c. Celle-ci est liée à C_a et Φ_a par la relation :

$$R_c = \frac{2\,C_a}{1-t_g\,\Phi_a}$$

  Cet essai ne serait donc pas suffisant pour déterminer C_a et Φ_a. Cependant, l'angle Φ_a est faible et les valeurs de R_c sont inférieures à la valeur théorique et pratiquement $C_a \simeq 1/2\ R_c$ pour les limons.
  Le calcul réalisé ainsi à partir de C_a seule va donc dans le sens de la sécurité. On pourra réduire le coefficient de séeurité à 2, surtout pour le groupe 3 où la présence de cailloux dans le sol (et non dans l'échantillon) induira un supplément de frottements.
- Si un quelconque danger de saturation est présent : le limon saturé n'a plus de cohésion ($C_a = 0$). L'essai R_c est inutile.

. Les tassements.

Comme pour le temps de travail, on pourra effectuer les essais à W % naturelle maximale. Un essai à saturation est cependant à prévoir pour évaluer le danger d'effondrement, surtout dans le groupe 2.

3. Propriétés des principaux groupes.

Groupe 1 :

Aucune fondation n'est possible dans le cas général.

Groupe 2 :

Pour les teneurs en eau naturelle des cas les plus défavorables (excepté la saturation) le loess a une cohésion apparente C_a de l'ordre de 5 T/m2 (Cf § II C 1.), soit une pression limite (par la formule de Kerisel ou celle de Meherhof) d'envrion 25 T/m2.

Le taux de travail, en adoptant le coefficient 2, sera :

$$\tau = 1{,}3 \text{ kg/cm2}.$$

Ce taux de travail est, la plupart du temps, inférieur à la pression de consolidation à l'oedomètre (P_c) : le tassement est alors négligeable. Dans le cas où $\tau > P_c$, les tassements peuvent être assez importants. On pourra être amené à réduire le taux de travail.

Remarquons cependant que le tassement est instantané (sol non saturé). Il entrera donc en jeu dès l'application des charges, ce qui est un facteur favorable.

Sans préjuger des essais qui doivent être réalisés dans chaque cas, on peut remarquer que le groupe 2 (loess stricto sensu et loess sableux) n'est pas à priori, une mauvaise couche de fondation.

Ces estimations ne sont cependant valables que si aucune saturation n'est possible. On s'en préservera en détournant le plus possible de la construction les eaux superficielles et souterraines. Le risque accidentel ne doit pas être oublié (rupture de canalisation).

Groupe 3 :

Le taux de travail calculé à partir de la cohésion apparente C_a seule est comparable à celui du groupe 2.

A ce calcul s'ajoute deux facteurs favorables :

- si la couche de loess (groupe 2) est assez épaisse, le facteur de consolidation γ dD n'est pas négligeable.
- les granules et cailloux calcaires injectés par cryoturbation augmenteront le frottement.

Le tassement restera faible : ceci n'est pas dû à une quelconque pression de consolidation P_c pour le groupe 2, mais au faible coefficient de compressibilité (Cf § II C, 2). Il y a toujours tassement, mais faible.

Le tassement est pour une grande part instantané (sol non saturé).

A la différence du groupe 2, la saturation n'est plus susceptible d'entrainer un effondrement. La structure est, en effet, beaucoup plus dense.

Enfin, ce tassement n'affectera qu'une couche de faible épaisseur ($h < 2$ m).

4. Les différentes zones de fondations (première partie de la cartographie géotechnique).

Les conclusions précédentes sur les trois groupes de sols permettent de distinguer trois zones différentes selon l'épaisseur du limon (h) et la nature du substratum.

- zone 1 : substratum sableux $h > 1$ m. Le loess est dons sableux, il n'existe pas de zone de mélange avec le marno-calcaire de Brie. Il n'existe qu'un seul type de fondations : sur le loess sableux (gr.2)

- zone 2 : substratum calcaire de Brie, 1 m < h < 3 m. Le groupe 2 n'est pratiquement pas représenté, les fondations ne seront possibles que sur le mélange loess-marno-calcaire (groupe 3).
- zone 3 : substratum calcaire de Brie, h > 3 m.
  Deux couches de propriétés différentes (groupe 2 et groupe 3) peuvent être utilisées pour les fondations.

Remarques :

On aurait pu distinguer une zone h < 1 m où aucune fondation n'aurait été possible sur le limon (gel), mais la superficie de cette zone est négligeable.
Certaines parties de zone devront faire l'objet d'études plus particulières (présence possible de la nappe dans le limon, limon éboulé, etc ..). Ces parties seront cartographiées différemment et le phénomène à étudier sera indiqué.

b) Fondations pour chaussées.

Je ne traitera dans ce paragraphe que la possibilité de fondation sur le limon en place non compacté. Le cas du compactage et des remblais est traité au paragraphe "terrassements".

La présence d'une chaussée entrainant toujours la saturation presque totale du sol sous-jacent, il est indispensable de faire les essais de portance après inhibition (CBR 4 jours).

Les résultats cités ne concernent que le groupe 1 et le groupe 2. Les essais réalisés sur le groupe 3 ne sont pas assez nombreux pour être représentatifs.

TABLEAU Nº 39

		Groupe 1	Groupe 2
C.B.R.	à W % naturelle maximale	4 à 5%	8 à 12%
	après imbibition de 4 jours.	2%	2%
Module de WESTERGAARD	W % naturelle	4 kg/cm2/cm	8-10 kg/cm2/cm
	Zone très humide	2 kg/cm2/cm	2 kg/cm2/cm
Kh		0,59 cm2/h	0,46 cm2/h

Indice CBR et module de Westergaard
des sols du groupe I et du groupe 2.

L'indice CBR et le module de Westergaard sont donc faibles (à W % élevés) et peu différent d'un groupe à l'autre. Le limon en place est un mauvais sol de fondation pour chaussée. On remarquera cependant que les résultats du groupe 3 doivent être nettement plus favorables (les quelques essais réalisés vontdans ce sens).

2/ Les terrassements.

En saison humide, la teneur en eau naturelle dépasse les limites de plasticité des différentes couches, ce qui entrainera un terrassement parfois difficile sauf pour le loess sableux moins plastique.

a) Les déblais.

Bien que très sensible à l'eau, le loess stricto sensu et le loess sableux en place présentent une caractéristique très favorable. La perennité des talus verticaux. Cette tenue remarquable est dûe :

- à l'anisotropie de perméabilité (Cf § II C 1º) due à la haute valeur de la perméabilité verticale (tubulures)
- le dépôt d'une très fine couche de calcite en surface du talus
- la présence du lehm imperméable qui le surmonte.

On pourra donc creuser dans les sols du groupe 2 (loess stricto sensu et loess sableux) des talus verticaux en respectant toutefois les conditions suivantes :

- conserver la couverture de lehm (qui devra lui-même avoir une pente plus faible : 2/1 par exemple).
- éviter toute saturation
- adopter une pente différente pour la zone de mélange (2/1 ou 3/1).

b) Les remblais.

Il existe deux types de remblais exigeant des proprietes différentes :

- les remblais de "remplissage" (qui ne supportent aucune contrainte)
- les remblais de "fondation" (sur lesquels pourront s'appuyer des ouvrages (voies de communication)).

1- Les remblais de "remplissage".

Le limon pourra constituer un bon matériau de remplissage avec les précautions suivantes :

- ne pas le mettre en place en saison humide .
- remettre le lehm en couverture. C'est un excellent sol pour culture et l'on n'aura aucune difficulté pour engazonner les nouveaux remblais,
- effectuer un léger compactage.

2- Les remblais de "fondation"

α) Compactage.

Les résultats des essais Proctor Normal (P.N.) et Proctor Modifié (P.M.) sont induqués sur les tableaux nº 40 et 41. Les densités sèches optimales (γ d.opt.) obtenues pour ces deux essais sont très différentes (+ de 5%). Dans ce cas, l'habitude est d'essyer d'obtenir la valeur γ d.opt. PN pour les voies de circulation importantes (autoroutes, etc...) et 95% γ d.opt. PN pour les routes moyennes et secondaires.

Le groupe 1 (lehm)

L'intervalle des teneurs en eau (W % naturelle) en saison sèche et en saison humide est indiqué sur le même tableau que les essais de compactage (tableau 41). On y constate qu'aux W % naturelle :

- il est impossible d'obtenir γ d.opt. PM
- γd.opt PN ne peut être obtenu qu'en saison sèche. En saison humide, un supplément d'énergie (PM) n'apporte pratiquement pas d'augmentation de γ d.

En conclusion, dans tous les cas, il est inutile d'utiliser l'énergie PM et l'on ne peut espérer un bon compactage qu'en saison sèche.

Le groupe 2 (loess stricto sensu et loess sableux)

Les diagrammes Proctor sont sensiblement les mêmes pour le loess stricto sensu et le loess sableux. Seules, les W % nautrelles changent

selon le substratum (Cf tableau 40).

a) Le loess stricto sensu.

- il est impossible d'obtenir γ d. opt PM,
- γ d.opt PN ne peut être atteint qu'en saison sèche et pour une énergie de compactage comprise entre PN et PM.

b) le loess sableux sur substratum sableux.

- en saison humide, γ d. opt PN peut être atteint pour une énergie comprise entre PN et PM,
- en saison sèche, il suffit de l'énergie PN pour atteindre γ d. opt PN.

β) Portance des remblais.

Pour les groupes 1 et 2, les essais CBR normalisés ont donné les résultats suivants (2 premières colonnes du tableau 42) :

TABLEAU Nº 42.

	CBR (PM)	CBR (PM) après imbibition de quatre jours	CBR (PN)	CBR (PN) après imbibition de 4 jours.
GROUPE 1	21%	5%	8%	2%
GROUPE 2	18%	5%	7%	2%

Indice CBR des sols du groupe 1 et du groupe 2 après différents compactages.

Malheureusement, les essais CBR normalisés sont faits à γ d. opt PM, ce qui, dans notre cas, n'est pas représentatif puisque seul γ d.opt PN peut être atteint. Le PN représentant environ 90% du PM, on adopte dans ce cas un coefficient correctif de 0,4. On obtient alors les résultats consignés dans la 2e partie du tableau(3 & 4e colonne)

Ces résultats, très comparables à ceux du loess et du lehm en place, sont ceux d'un sol de portance très moyenne.

Le groupe 3.

Je ne possède malheureusement pas assez d'essais sur ces couches de mélange pour pouvoir en déduire des conclusions sûres. Les quelques résultats obtenus tendraient à prouver que cette zone se rapproche du lehm pour le compactage et la portance en remblais.

γ) Conclusions.

Les essais : il est inutile de faire des essais CBR à γ d. opt PM, celle-ci ne pouvant jamais être atteinte.

La portance : sans traitement spécial, quelle que soit la couche de limon et le compactage, l'indice portant CBR ne pourra dépasser 5% à saturation, ce qui est très faible. Le traitement à la chaux l'améliore, et il serait à ce stade très utile d'en tenir compte dans le calcul de la chaussée.

Le terrassement et le compactage : le tableau 43 résume les possibilités de terrassement et de compactage pour les trois couches étudiées (lehm, loess stricto sensu et loess sableux) ainsi qu'une estimation des résultats sur la couche de mélange.

c) Les différentes zones de terrassement et de compactage.
(2ème partie de la cartographie géotechnique).

Les études de terrassement et de compactage permettent de reprendre la division en trois zones établie dans le § "fondations".

Zone 1 :

En toute saison, le terrassement sera aisé. Les talus en déblais, hors saturation, pourront être creusés verticaux. Le loess sableux est peu plastique et sa teneur en eau naturelle lui permet, en toute saison, d'être compacté à γ d. opt PN.

Zones 2 et 3 :

En saison sèche, les difficultés de compactage et terrassement seront reduites. En saison humide, γ d. opt PN ne pourra être atteinte, même en utilisant une énergie de compactage élevée (donc un nombre de passage d'engins élevés). Le terrassement sera difficile.

La seule différence entre la zone 2 et la zone 3 viendra du fait qu'en zone 3 seulement pourront être creusés des talus verticaux (dans la couche de loess stricto sensu et de loess sableux).

Pour ces deux zones, le travail de chantier en saison humide peut être cependant amélioré :

1. en traitant le limon à la chaux. C'est la meilleure solution, elle améliore le terrassement, le compactage et l'indice portant CBR.
2. s'il est indispensable d'obtenir γ d.opt PN (voies à grande circulation) : il faut absolument abaisser la teneur en eau naturelle -(tableau 40). On peut attendre une période de beau temps, scarifier et parfois retourner le sol (au motorgrader ou avec d'autres engins) et le laisser s'assécher,
   - évacuer en permanence et très soigneusement les eaux de pluie
   - mélanger le loess et le lehm pour le compactage
   - utiliser les rouleaux "pieds-de-moutons".
3. si 95% seulement de γ d. opt PN est désiré, on peut, dans certains cas, compacter à la teneur en eau naturelle. On place une couche de 15 à 30 cm de bon sol perméable (grave, sable grossier) et on compacte à travers cette couche au moyen de pneus très lourds. Un autre type de compactage à des teneurs en eau aussi élevées par rapport à W opt entrainerait le phénomène de matelassage.

F. CONCLUSIONS ET ESSAI DE RECONSTITUION GENETIQUE.

Le loess du plateau d'Orly est incontestablement un dépôt éolien. Les arguments à l'appui de cette origine sont les suivants :

- absence complète de stratification,
- forme caractéristique des courbes cumulatives avec prédominance de la fraction 50 µ - 10 µ ,
- absence de fossiles tertiaires et présence en grand nombre de foraminifères de la craie à coquilles intactes.

D'autre part, dans toutes les coupes que j'ai pu observer, l'homogénéité verticale du loess était remarquable, sans chengement de faciès, ni traces de lehm ancien ou de paléosols, le fuseau granulométrique très étroit et la minéralogie constante. La seule variation est latérale et provient de l'apport de sable de Fontainebleau des buttes situées à l'ouest du plateau.

Il s'agit donc très probablement d'un dépôt unique.

N'ayant effectué aucun essai de datation, il ne m'est pas possible de rattacher ce dépôt de façon formelle à l'une des périodes glaciaires. Cependant, il est à noter que son faciès et sa granulométrie le rapproche beaucoup des loess calcaires de la dernière période du Würm.

Les vents dominants à cette époque étaient des vents d'ouest et la morphologie du dépôt en est marquée : absence de loess sur le versant tourné à l'ouest, épaisseur importante sur le versant tourné à l'est (sous le vent). On lui doit également le transport sur de faibles distances de grains de sable de Fontainebleau, roulés ou transportés au ras du sol et enfin déposés avec le loess. Chaque printemps, une végétation de steppe froide prenait possession du plateau : c'est

aux radicelles de ces plantes que l'on doit les petites concrétions résistantes (type 1) que l'on trouve sur toute l"épaisseur du dépôt. C'est probablement sur les brindilles que se fixait le dépôt de l'année suivante.

Il existait sous ce climat périglaciaire, un pergélisol débutant dans le marno-calcaire de Brie. Si l'effet du dégel n'entrainait que peu de mouvements dans le mollisol sur le plateau proprement dit, très horizontal , il provoquait des phénomènes de solifluxion sur les versants. Par contre, la cryoturbation affecta les couches horizontales. Au moment du regel qui débutait par la surface, la couche du sol non encore atteinte par le gel devait subir des contraintes différentielles importantes dues au développement de lentilles de glace. Les injections de marnes et de petits blocs dans la partie inférieure du dépôt en sont les conséquences.

La fin des périodes glaciaires marqua le début de la formation du lehm, niveau qui présente tous les caractères d'un horizon pédologique, "B". La première phase de cette évolution pédologique fut la décarbonatation et le dépôt de calcite dans la frange immédiatement inférieure. Cette remise en mouvement de la calcite fut à l'origine de la formation des concrétions friables (type II) et probablement des fibres par circulation descendante et dépôt dans les tubulures de type 1 préexistantes. Intervint ensuite le phénomène d'illuviation : déplacement d'argile sous forme colloïdale avec concentration en profondeur dans les pores fins et à la surface des aggrégats. C'est la création de la zone d'accumulation d'argiles que l'on trouve actuellement à la base du lehm. La limite très nette qui existe entre cette zone et le loess carbonaté proprement dit demeure cependant une énigme. L'homogénéité du loess et de la végétation est elle suffisante pour l'expliquer ou quelque phénomène chimique ou mécanique (niveau de la nappe, front de gel) doivent-ils être invoqués ?

La structure très aérée du loess a sa première cause dans le

caractère éolien du dépôt qui fournit une granularité étroite, donc à priori, favorable à une grande porosité. Mais la disposition des particules argileuses qui recouvrent les grains et constituent des ponts entre ceux-ci ne peut être dû qu'à un léger remaniement. Elles se sont certainement mises en place au moment du dépôt par circulation d'eau (filtration, percolation). La végétation qui a déterminé la création des tubulures de type 1 a sans doute joué un rôle.

L'affaissement de cette structure dans la partie inférieure peut avoir plusieurs causes :

- la cryoturbation qui l'affecta
- la présence de la nappe à une cote plus élevée qu'elle n'est actuellement (dégel post-glaciaire ?).

La formation du lehm entraina la remise en mouvement des particules argileuses dans la partie supérieure, y détruisant ainsi la structure. Cette altération pédologique entraina peut être aussi le dépôt sur certains ponts argileux du loess sous-jacent d'une fine pellicule de calcite. Elle ne doit pas jouer de rôle dans la résistance du loess comme le prouve l'influence considérable de la teneur en eau sur les propriétés géotechniques.

La formation du lehm eut une autre conséquence, celle de faire du plateau une très riche terre de culture.

Du point de vue géotechnique, la différenciation des limons du plateau d'Orly en plusieurs niveaux permet de lever , dans une certaine mesure, la méfiance des constructeurs à l'égard du limon en général. Le problème fondamental de l'affaissement peut être localisé à certaines zones seulement (présence de loess stricto sensu et critère de densité). De plus, certaines précautions (Cf § II, E, 1) permettent d'en limiter le danger.

En tenant compte de ces distinctions et de ces précautions les limons du plateau d'Orly ne doivent pas être considérés comme un "mauvais" sol de fondation.

III

LE PLATEAU DE ROISSY-EN-FRANCE

III. LE PLATEAU DE ROISSY EN FRANCE

A. INTRODUCTION GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE (Cf carte)

Le plateau de Roissy-en-France appartient à la région naturelle du Parisis. Il a très approximativement la forme d'un rectangle de 8km (N-S) sur 12km (E-W), limité par les vallées du Rhin (N), du Sausset (S), du Crould (W) et de la Beronne(E). Il est faiblement ondulé, en pente douce vers le sud (NGF 119 au nord à NGF 60 au sud) où il atteint la banlieue nord de Paris. Il est entaillé par un thalweg important de direction nord-sud, celui de Mitry-Mory, à l'est, et par de nombreux autres de dimensions plus réduites, à sa périphérie (ruisseau du Creuset, rivière de La Marée).

Quelques villages seulement sont situés sur le plateau proprement dit (Roissy-en-France, le Mesnil-Amelot, Mauregard), la plupart s'étant installés dans les vallons, à sa périphérie (Louvres, Le Thillay, Gonesse, Tremblay-les-Gonesses, Mitry-Mory).

Ce fut l'aéroport du Bourget, au sud, qui remit le premier en cause la vocation agricole (céréales, betteraves, colza) à laquelle la richesse de sa terre avait voué le plateau. Cette vocation est actuellement en voie de disparaitre du fait des nombreux ouvrages que nécessite l'extension de l'agglomération parisienne : autoroute du nord, zone industrielle de Gonesse et surtout l'aéroport de Paris-Nord dont l'emprise s'étend sur près d'un quart du plateau.

Géologie.

Deux cartes au 1/50000 couvrent le plateau (L'Isle-Adam et Dammartin-en-Goële).

La succession des terrains est la suivante, de haut en bas :

- le limon du plateau,
- les alluvions du thalweg de Mitry-Mory,
- les masses et marnes du gypse présentes sur le plateau à l'état de butte témoin au lieu-dit "les Platrières",
- les marnes et sables infra-gypseux : ces marnes et sables bariolés avec rognons de calcaire et blocs de grès couvrent une grande partie du plateau, mais avec des épaisseurs faibles,
- le calcaire de St Ouen constitué d'alternances de marnes blanchâtres, généralement compactes, et de bancs ou blocs de calcaire dur, parfois silicifié , fut l'objet d'exploitations,
- les sables de Beauchamp,
- les marnes et caillasses.

Le tableau 45 réunit la désignation de ces formations, leur position dans la série stratigraphique et les notations sur la carte au 1/50000.

L'ensemble des assises est incliné vers le sud-ouest, en direction de la fosse de St Denis. La remontée des assises vers le nord est accentuée par le passage de la ride anticlinale de Louvres. Le modelé du relief est déterminé par la formation du marno-calcaire de St Ouen. Cette assise résistante avec niveaux silicifiés constitue, en effet, l'entablement légèrement ondulé du Parisis.

B. DESCRIPTION DE QUELQUES COUPES ET MORPHOLOGIE.

L'étude des coupes de sondages (plus de 600) qui comprenaient souvent l'indication de la teneur en carbonates et l'observation personnelle de quelques coupes mises à jour à l'occasion de travaux m'ont permis de les classer en trois grandes zones.

Zone 1 :

Sous un limon décarbonaté brun (lehm) de 0 à 2,5 m d'épaisseur il existe un limon carbonaté brun clair (loess) (Cf coupe 1 et 2).

Zone 2 :

Le dépôt limoneux est décarbonaté sur toute son épaisseur (Cf coupes 3 et 4).

Zone 3 :

Le limon apparait alluvionnaire (lentilles de marnes ou de sables, classement plus ou moins net du dépôt). C'est le thalweg de Mitry-Mory.

Je n'ai pu observer personnellement et prélever des échantillons que dans les deux premières zones, les travaux dans le thalweg étant trop avancés quand j'ai débuté mon étude. Heureusement, la densité de sondages et d'essais étant importante, il était possible d'en étudier la stratigraphie et les propriétés.

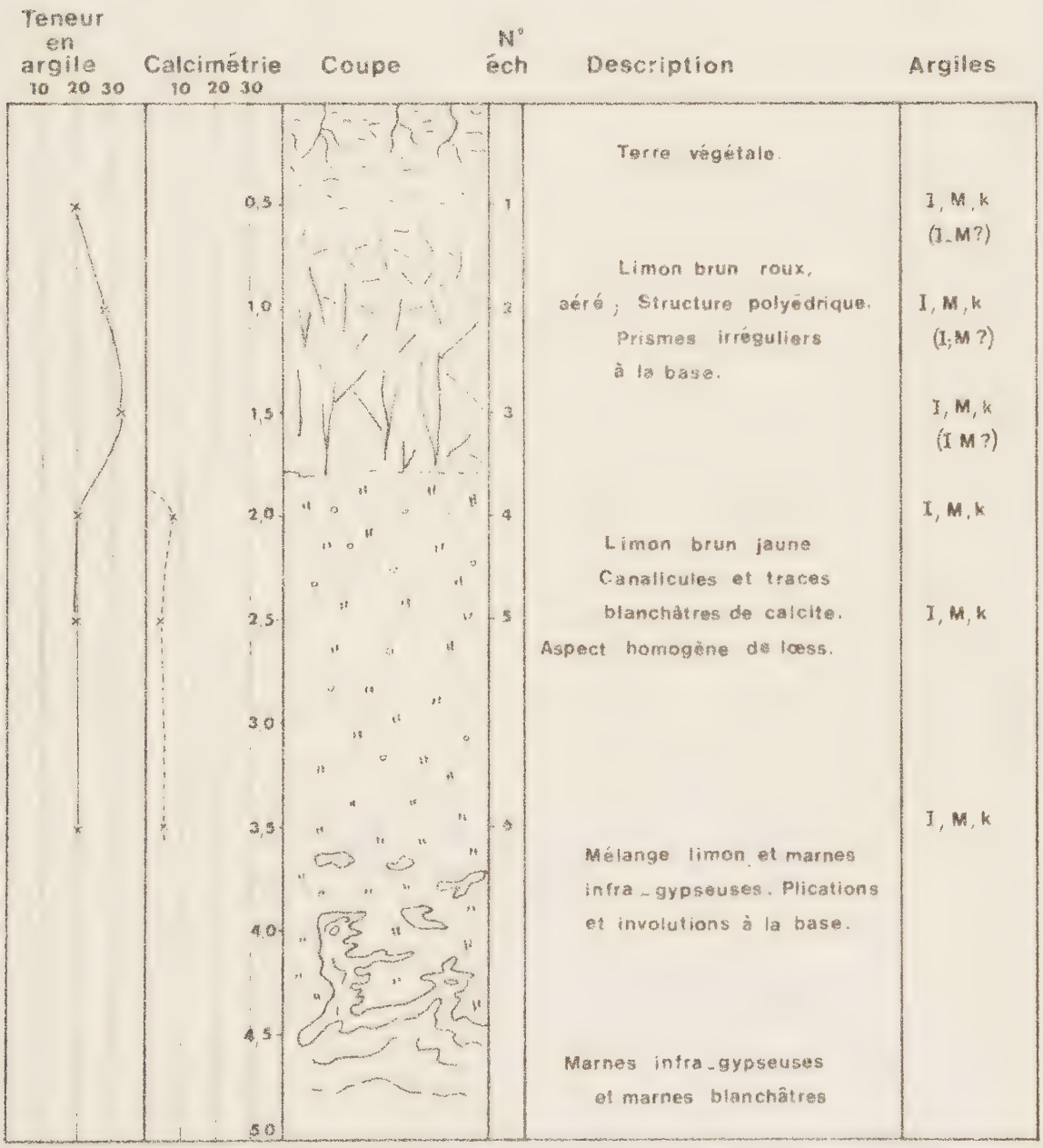
Chacune de ces trois zones fera donc l'objet d'un chapitre particulier, mais je débuterai auparavant par la morphologie du dépôt dans son ensemble.

1) Description de quelques coupes .

COUPE 1 : Aerogare

X = 615.075

Y = 145.961

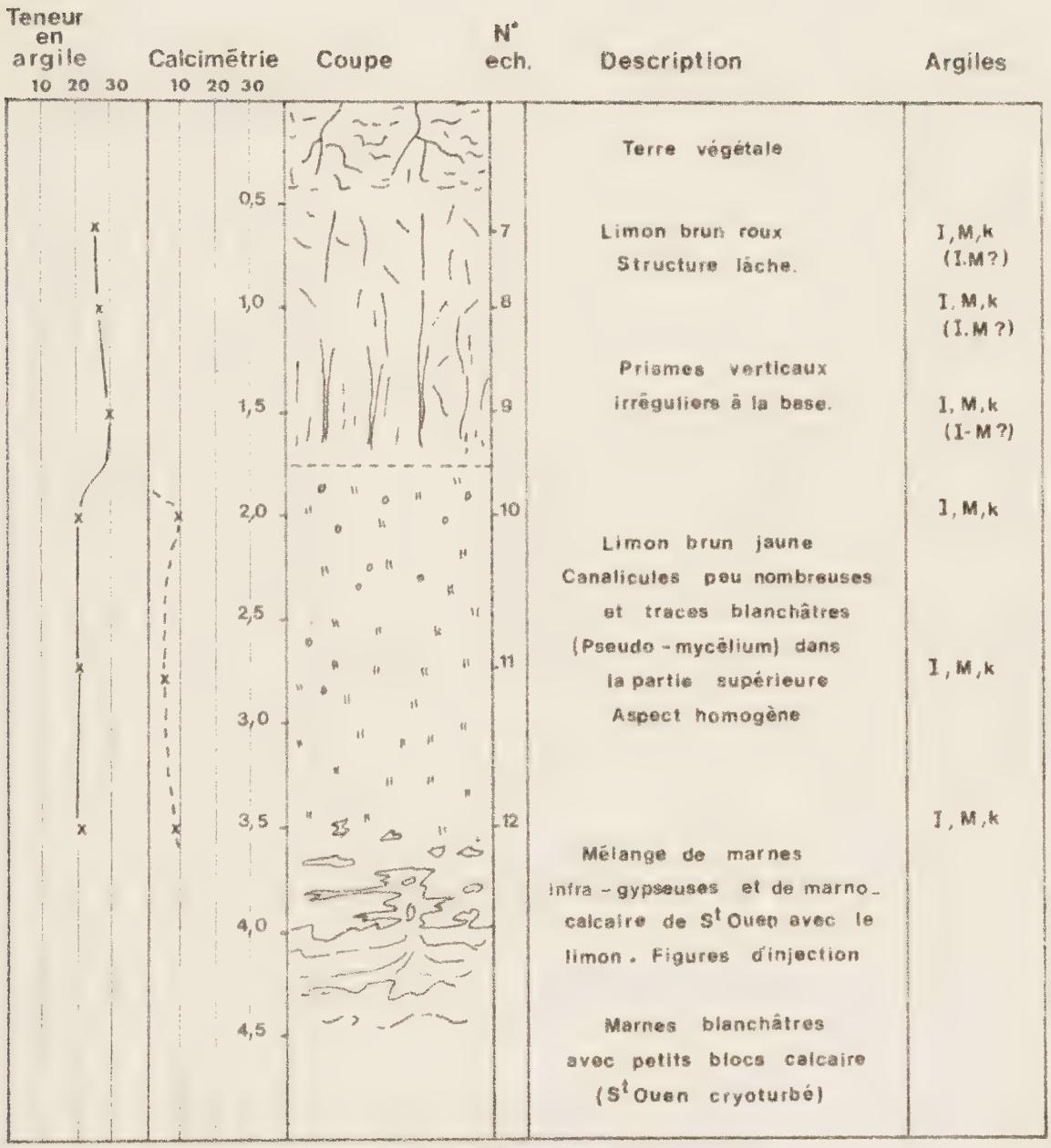


I : ILLITE _ M : MONTMORILLONITE _ k : KAOLINITE _ IM : INTERSTRATIFIES .

COUPE 2 : Aérogare

X = 615.068

Y = 145.962

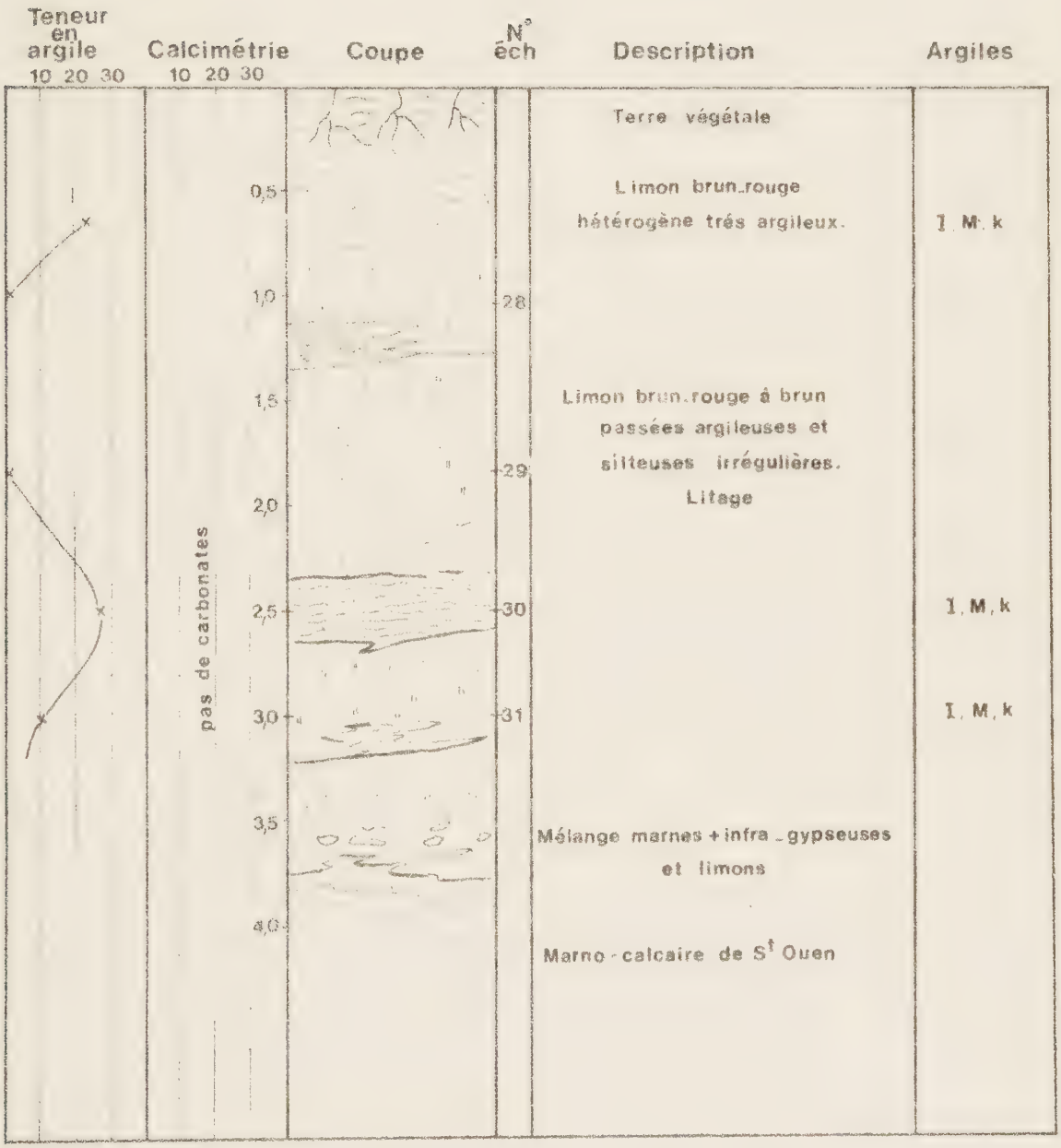


I : ILLITE _ M : MONTMORILLONITE _ k : KAOLINITE _ IM : INTERSTRATIFIES _

COUPE 3 : Ouest de la ferme des Mortières .

X = 614.200

Y = 145.000

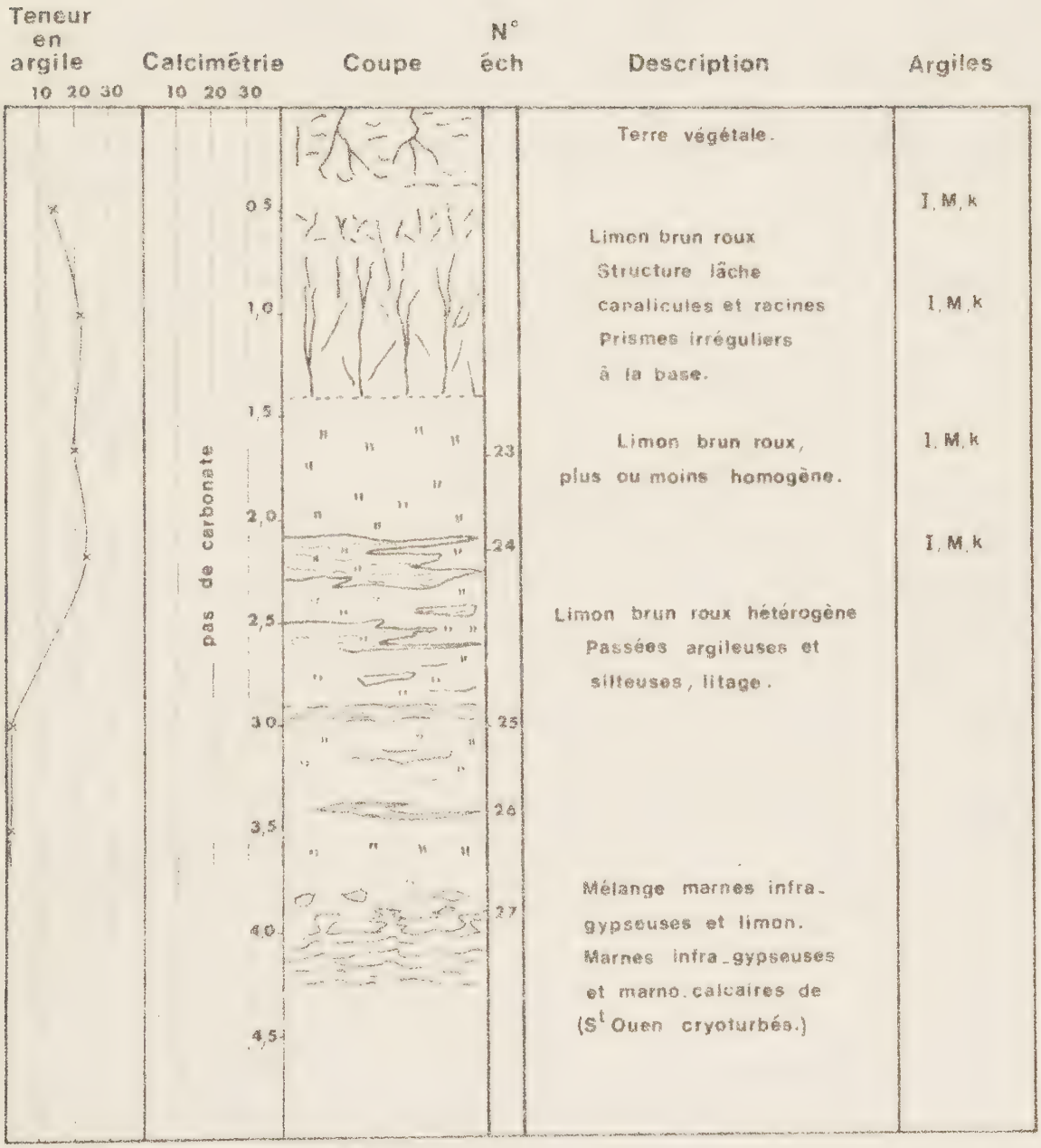


I : ILLITE _ M : MONTMORILLONITE _ k : KAOLINITE _ IM : INTERSTRATIFIES _

COUPE 4 : Ouest de la fermes des Mortières .

X = 614.200

Y = 145.200



I : ILLITE - M : MONTMORILLONITE - k : KAOLINITE - IM : INTERSTRATIFIES -

2) Morphologie du dépôt.

Les résultats obtenus grâce aux coupes de sondage effectuées à l'occasion de travaux de Génie Civil (aéroport, autoroute), sont résumés en une carte d'épaisseur et une carte du substratum.

Les restrictions formulées à l'occasion de la réalisation de la carte d'épaisseur du limon sur le plateau d'Orly (Cf § II,B,2ª) demeurent valables pour celle-ci. Précisons seulement que, en dehors de l'emprise de l'aéroport de Paris-Nord, la densité de sondage est très faible et les isopaques, en conséquence, seulement estimés (tracé en pointillé).

Les enseignements que l'on peut tirer de ces cartes sont les suivants :

a) de la carte du substratum.

On distingue bien la topographie pré-existante au dépôt. Les anciens thalwegs sont marqués par l'érosion complète de la couche de marnes infra-gypseuses. Les zones de calcaires de St Ouen marquent ainsi la présence des anciennes circulations d'eau superficielle. En un seul lieu, le thalweg de Mitry-Mory, l'érosion a dépassé ce niveau pour atteindre, sous les sables de Beauchamp, celui des marnes et caillasses.

Si on compare cette surface avec l'actuelle, on constate que les thalwegs actuels reprennent le tracé exact de ceux antérieurs au dépôt de limon.

b) de la carte d'épaisseur du limon.

L'épaisseur de cette couche est décroissante du nord au sud, sa valeur maximale atteignant 6 à 7 m.

Hormis celui de Mitry-Mory, tous les thalwegs actuels sont entièrement dans le limon.

Contrairement au plateau d'Orly, le limon s'est donc mis en place sur un substratum en pente, vallonné et sans butte sableuse. Il fut lui-même repris par l'érosion et sa morphologie en est profondément marquée.

C. LES DIFFERENTES ZONES DE LIMON

1) La zone de limon carbonaté.

Il existe, en fait, un passage continu d'un limon contenant de 8 à 10% de carbonate au limon complètement décarbonaté. Cependant, les niveaux de teneur en Ca CO3 supérieure à 2% qui sont étudiés dans ce chapitre présentent un faciès assez constant pour être considéré comme un type bien défini.

Le limon calcaire est, en effet, homogène, non lité, jaune-brun clair en saison sèche à brun en saison humide. Les concrétions calcaires y sont peu nombreuses, de petite taille et friables. Sa partie supérieure est altérée en un sol brun lessivé, complètement décarbonaté. Sa partie inférieure est mélangée avec le substratum (sur 1 à 2,5 m d'épaisseur) ; les figures de cryoturbation y sont très nombreuses et de grande taille, surtout dans les zones marneuses et marno-calcaires. On y trouve quelques poupées de loess à la base, mais elles sont incluses la plupart du temps dans les marnes injectées.

On trouve parfois, à la base de ce limon, des placages de limons décarbonatés, fortement remaniés et plus ou moins mélangés avec le substratum. Dans un petit thalweg, au nord de Roissy, un sondage a découvert sous la première série (terre végétale, sol brun, limon carbonaté) une seconde série complète comprenant paléosols, lehm et limon carbonaté. Malheureusement, cette zone étroite est actuellement recouverte et n'a pu faire l'objet d'aucune coupe de ma part

a) Etude Pétrographique.

1. Granulométrie.

Les courbes cumulatives obtenues au bac Rivière (tableau 46) sont incluses dans un fuseau étroit et de forme caractéristique. 65% des grains sont compris entre 80 µ et 10 µ . Le pourcentage d'argile (< 2 µ) varie de 18 à 22%. Sur un diagramme triangulaire (tableau 56), ces limons se situent incontestablement dans la catégorie des loess. Les caractéristiques de réaction au gel, déduites de la granulométrie (Cf § II,C,1º,a) sont celles d'un matériau sensible au gel. Elles confirment ainsi l'origine de nombreuses modifications (injections, cailloux dressés ..) au niveau du substratum et en surface.

2. Composition minéralogique.

Ce loess est essentiellement constitué de quartz, d'argiles, de calcite et de feldspath (tableau 47).

Le quartz constitue la majeure fraction comprise entre 5µ et 80 µ , mais il existe également dans la fraction inférieure à 5µ . Les grains sont anguleux, à arêtes vives, transparents quand ils sont débarassés, par lavage, de leur couverture argileuse.

Le calcite. La teneur en carbonate des échantillons est très variable (entre 2 et 10%), tant latéralement que verticalement. Ainsi, pour la coupe nº 2 les teneurs sont les suivantes :

Profondeur	Teneur en Ca CO3
2,0	8,5
2,5	5,0
3,0	7,5

Elle est pour la plus grande part disséminée dans la masse, en grains de petite taille ($< 5\ \mu$). Il existe cependant quelques petites concrétions, friables, en forme de placages ou de tubulures autour de vides, surtout dans la partie supérieure du dépôt. De même qu'à Orly (Cf § II,C,1º) ces concrétions observées au microscope électronique révèlent un enchevêtrement de fibres assez rigides.

Les argiles représentent environ 20% en poids du loess. Elles comprennentde l'Illite(40 à 50%), de la Montmorillonite (30,à 40%) et de la Kaolinite (10 à 20%) (Cf tableau 48).

3. La structure du loess

Les mesures de densité sèche (30 échantillons) sont résumées dans le tableau suivant :

	Extremes		Moyenne
γd	1,47	1,66	1,55
e	0,83	0,62	0,74
n	45,5	38,2	42,5

Cette porosité moyenne (42,5%) est considérable. Elle est uniquement dûe à la structure très aérée du loess car les tubulures sont pratiquement absentes.

Au microscope électronique, le loess de Roissy apparait comme intermédiaire entre le loess et le lehm d'Orly (Cf § II,C). La disposition générale avec grains isolés recouverts d'une pellicule argileuse plus ou moins orientée et ponts argileux, est la même que celle du loess d'Orly. Cependant, la proportion d'argile plus forte lui donne l'aspect plus "empâté" du lehm (photo nº 19 et 20).

b) Etude géotechnique.

1. Plasticité (limites d'Atterberg)

Le tableau suivant résume les résultats obtenus sur 15 échantillons :

	Extremes		Moyenne
W_l	29,0	40,5	35,5
W_p	12,5	18,0	16,5
I_p	18,0	24,0	20,7

Le loess se situe donc, dansla classification de Casagrande (tableau 49) nettement au-dessus de la ligne "A" au niveau des "argiles inorganiques de plasticité moyenne".

L'indice d'activité colloïdale ($\frac{I_p}{d_{2\,\mu}}$) vaut approximativement l'unité. C'est une activité "normale" légèrement supérieure à celle de l'Illite.

La teneur en eau à saturation, calculée avec indice des vides maximal, soit 0,83 est de 30,4%. La limite de liquidité n'est donc pas atteinte en général. Aux teneurs en eau maturelles (Cf § III,D), la limite de plasticité est souvent dépassée. Le terrassement sera donc difficile.

2. Perméabilité.

La perméabilité verticale est en moyenne de $2,0 \times 10^{-9}$ m/sec. (tableau 50). Elle est nettement plus faible que celle verticale du loess

d'Orly, mais très comparable à sa perméabilité horizontale. Ceci confirme le rôle déterminant des tubulures dans la valeur de l'anisotropie de perméabilité du loess.

3. Essais à l'oedomètre.

La courbe de consolidation (tableau 51 et 52) est constituée de deux branches distinctes : une droite horizontale (peu de tassements) suivi d'une droite de pente assez forte (importante variation de l'indice des vides).

- la pression de consolidation P_c varie de 1,8 à 3,3 bar. L'indice de compression C_c ($\simeq$ 0,23) est nettement supérieur à la moyenne de ceux obtenus pour un silt. L'indice de gonflement est très faible.
- Le tassement instantané (sans évacuation d'eau) est considérable (> 50%).

4. Essais au triaxial.

Aux teneurs en eau naturelles, l'angle de frottement apparent Φ_a est nul. La cohésion apparente C_a varie de 0,65 à 0,9 bar (tableau 53).

5. Résistance à la compression simple.

Le tableau 54 résume les valeurs de R_c et leur variation en fonction de la teneur en eau. Elle varie de 4,5 bar pour W = 17% à 1,0 bar pour W = 26% (valeurs limites de la teneur en eau naturelle).

2) La zone de limon décarbonaté.

L'étude de la couche superficielle (altération en sol brun-lessivé ou lehm), toujours décarbonatée, fait l'objet du chapitre III, C,3º. Elle n'est pas abordée dans celui-ci. Le limon décarbonaté dont il s'agit ici en est très différent par son épaisseur, sa structure et la quasi absence d'interstratifiés.

Le limon décarbonaté présente de nombreux faciès, Certaines coupes révèlent un limon d'aspect homogène, non lité, d'autres, au contraire, sont constitués par une succession très irrégulière de passées argileuses, silteuses, en lentilles ou en couches. Il n'existe cependant aucune trace d'apport extérieur (graviers, marnes ou sables), sauf dans la partie inférieure qui est un mélange avec le substratum. Les figures de cryoturbation sont rares et peu nettes. La couleur est uniforme et peu différente du limon carbonaté.

a) Etude pétrographique.

1. La granulométrie.

L'hétérogénéité de ces limons se reflète dans la variété des granulométries (tableau 55). Toutes les courbes sont comprises dans un fuseau dont les courbes enveloppes sont :

- d'une part, une courbe très semblable à celle du loess pour la fraction supérieure à 10 µ , mais dont la fraction argileuse est presque inexistante. C'est le type "A",
- d'autre part, une courbe qui se rapproche beaucoup plus de celle d'un limon fluviatile (EDELMANN, 1946) sans prédominance d'une fraction granulométrique. La teneur en argile dans ce cas peut atteindre 30 à 35%. C'est le type "B".

Il existe tous les cas intermédiaires et, en particulier, des courbes très semblables à celles du loess carbonaté et qui correspondent

aux coupes où le limon apparait homogène (type "C").

Remarquons que dans tous les cas, la fraction supérieure à 100 µ est pratiquement inexistante.

Sur un diagramme triangulaire (tableau 56) le type "C" se situe dans la catégorie des loess, mais les types "A" et "B" s'en éloignent sensiblement.

2. Composition minéralogique..

Le limon décarbonaté ne présente que des différences minéralogiques quantitatives d'avec le loess carbonaté (tableau 57) :
- le quartz a le même aspect et la même granularité,
- quand l'argile est présente (types "B" et "C"), la proportion des minéraux y est semblable (tableau 58).

3. La structure.

La densité est très variable selon les faciès. On peut cependant faire les remarques suivantes :
- la porosité est, en moyenne, plus faible que celle du loess carbonaté,
- les valeurs les plus fortes sont obtenues pour les limons de granularité voisine de celle du loess (type "C"),
- au contraire, les types "A" et "B" ont des porosités sensiblement plus faibles.

Les différences de granularité dans le limon s'accompagnent donc également de modifications dans la structure, allant dans le sens d'une augmentation de la densité.

b) Etude géotechnique.

L'hétérogénéité de granulométrie et de structure de ce limon

se traduit par des différences sensibles au niveau des propriétés géotechniques.

1. Plasticité (limites d'Atterberg).

Elles varient entre les extrêmes suivants :

	W_l	W_p	I_p
type "A"	30,1	13,6	13
type "B"	40,8	22	25,1

Il existe tous les intermédiaires (en particulier les valeurs du type "C").

2. Perméabilité.

Elle est également variable (de 2×10^{-8} à 10×10^{-10} m/sec)

3. Essais à l'oedomètre.

Les courbes de consolidation reflètent également l'hétérogénéité de ce limon. Leur forme varie, en effet, en fonction de l'indice des vides initial e_o (tableau 60).

Quand e_o est élevé (type "C") la courbe est constituée de deux parties bien distinctes : il existe une pression de consolidation Pc et l'indice de compressibilité Cc est important (tableau 61)

Quand e_o est faible (type "A" et "B") l'indice des vides varie de façon continue en fonction de la pression exercée. Pc n'existe plus et Cc devient faible.

Il existe tous les intermédiaires entre ces deux formes de courbes.

L'existence des courbes avec pression de consolidation pour des limons non carbonatés est importante. En effet, seule la fraction argileuse et la non saturation au moment de l'essai peuvent être à l'origine de cette "consolidation" accrue. Une quelconque cimentation par des carbonates qui auraient pu être envisagée pour les loess carbonatés (Orly ou Roissy) ne saurait être cette fois invoquée.

4. Essais au triaxial.

Aux teneurs en eau naturelles, l'angle de frottement ϕ a est nul. La cohésion apparente Ca varie entre 0,8 et 1,3 bar (tableau b2)

5. Résistance à la compression simple.

Elle est fonction de la teneur en eau (tableau 63).

La dispersion assez grande des résultats est dûe à l'hétérogénéité des limons.

3) La zone de surface - le lehm.

Il existe, presque partout, en surface du dépôt limoneux, une zone d'altération. Quand la roche mère est le loess carbonaté, la distinction est nette par la couleur (brun-rouge) et l'absence complète de concrétions blanchâtres. On y observe parfois l'embryon d'une structure prismatique.

Au contraire, sur le limon décarbonaté, la limite n'est pas décelable à l'oeil nu. Seule l'analyse granulométrique révèle un niveau plus argileux.

a) Etude pétrographique.

1. Granulométrie.

Elle est fonction de la profondeur et de la granulométrie du limon sous-jacent.

Sur loess carbonaté, la forme générale de la courbe cumulative (tableau 64) est caractéristique : 55 à 60% des particules sont comprises entre 10 et 60 µ et aucune ne dépasse 80 µ . La teneur en argile varie en fonction de la profondeur de façon régulière. Elle est d'abord croissante jusqu'à une profondeur de 1,5 à 2,0m, puis décroissante. Sa valeur maximale est de l'ordre de 30 à 35%.

Sur limon décarbonaté, la granularité ne varie plus régulièrement en fonction de la profondeur. Cette absence de zone d'accumulation d'argile et de toute structure caractéristique d'un horizon "B" (prismes ..) démontre que le limon décarbonaté n'a pas subi la même évolution pédologique en profondeur que le loess carbonaté.

2. Composition minéralogique.

Hormis les carbonates, absents, le limon de surface est constitué essentiellement des mêmes minéraux que le limon sous-jacent: quartz, feldspath et argiles comme le révèle l'analyse aux rayons X (tableau 65).

La fraction argileuse est composée d'Illite (40 à 60%) de Montmorillonite (30%) et de Kaolinite (10 à 20%). Il semble exister un faible pourcentage d'interstratifiés Illite-Montmorillonite (tableau 66).

En lame mince, on peut observer des revêtements argilo-ferrugineux le long et autour des vides. On distingue également quelques imprégnations ferrugineuses diffuses.

3. Structure.

La porosité est, en moyenne, plus forte que celle du limon sous-jacent. Sur loess carbonaté, la densité sèche varie, en effet, de 1,58 en profondeur (1,5 à 2,0m) à 1,46 juste sous la surface (0,5 à 0,8m). La variation est très irrégulière sur limon décarbonaté.

b) Etude géotechnique.

La différenciation des propriétés géotechniques de la zone d'altération par rapport à la roche mère n'est possible et spécifique que dans le cas du loess carbonaté. C'est pourquoi les résultats cités dans ce paragraphe se limiteront à ce cas :

1. Plasticité (limites d'Atterberg).

La teneur en argile augmentant, l'indice de plasticité augmente également

	Extremes		Moyenne
W_l	36	42	41
W_p	16	20	19
I_p	18	26	22

2. Perméabilité.

Le coefficient K varie entre 2 x 10^{-9} et 10^{-8} m/sec (tableau 67). La perméabilité est donc comparable à celle du loess.

3. essais à l'oedomètre .

Comme celles du lehm d'Orly, les courbes oedométriques du lehm de Roissy (tableau 68) sont constituées de deux branches distinctes. Il existe une pression de consolidation Pc et un coefficient de compressibilité Cc assez fort (tableau 69).

4. Résistance à la compression simple.

Les tableaux 70 et 71 résument les valeurs de cette résistance et sa variation en fonction de la teneur en eau à différentes profondeurs. On constate que la couche immédiatement sous la surface ($< 0,8m$) est assez hétérogène, les résultats sont très dispersés. Au contraire, la corrélation est plus satisfaisante pour la couche comprise entre 0,8 et 1,5m de profondeur.

4) La zone d'alluvions du thalweg de Mitry-Mory.

30 coupes de sondages effectuées sur le site du thalweg pour la construction du bassin de retenue de l'aéroport de Roissy m'ont permis de dresser plusieurs coupes transversales et une coupe longitudinale . On distingue ainsi trois séquences de matériaux remaniés (1,2,3 de bas en haut) et un dépôt de limon assez homogène intercalé entre les séquences 2 et 3.(Tableau 72) .

a) La séquence 1.

Débutant 50m en amont du barrage de retenue, cette séquence repose sur le sable de Beauchamp et, à son extrêmité aval, sur les marnes et caillasses. Son épaisseur maximale sur le site est de 5m. Elle est composée, de bas en haut, par :

- des alluvions grossières : sables, graviers de grès, cailloux calcaires à aspect légèrement roulé. La teneur en carbonates y atteint 11%.
- des alluvions plus fines constituées de sables fins jaunâtres ou grisâtres ou de sables plus ou moins marneux.
- des alluvions très fines de marnes avec quelques lentilles de sable fin.

Cette séquence ne comprend donc pas d'alluvions limoneuses.

b) La séquence 2.

Plus étendue que la précédente, puisque débutant environ 100 à 150m en amont du barrage, elle est constituée de matériaux plus fins en moyenne que ceux de la séquence 1. Son épaisseur varie de 1 à 3m. On peut la diviser en deux couches bien que le passage de l'une à l'autre soit très continu, soit, de bas en haut :

- une couche sablo-marneuse, brune-grisâtre avec trace de circulation d'eau.
- une couche marno-limoneuse, brune grisâtre.

Les essais sur un échantillon de chacune de ces couches sont résumés dans le tableau 74.

La granulométrie est très différente de celle du limon de plateau. Aucune fraction granulométrique ne prédomine. On constate, d'autre part, l'augmentation sensible de la fraction argileuse dans la partie supérieure (Tableau 75).

La teneur en carbonate est forte -(18,8%)

La densité est plus faible dans la partie supérieure (1,67 pour 1,87 dans la partie inférieure). Elle est respectivement égale et supérieure à celles de limon décarbonaté.

Les caractéristiques géotechniques sont voisines de celles du loess décarbonaté des types "A" et "B".

c) La séquence 3.

Son extension est plus grande que celle des deux autres séquences puisqu'on la rencontre sur toute la longueur du thalweg : de façon continue à l'aval eten nombreux placages vers l'amont. Son épaisseur est de deux à trois mètres au maximum.

Elle comprend, de bas en haut :

- une couche limoneuse,
- une couche argilo-limoneuse en surface. Ce niveau n'existe pas vers l'amont du thalweg.

1. Le niveau limoneux.

La granulométrie (tableau 76) est caractérisée par la prédominance de la fonction granulométrique 10 - 80 µ et l'absence pratiquement complète d'argiles. Cette forme de courbe avait déjà été rencontrée pour les limons décarbonatés du type "A" sur le plateau (Cf § III,C,2º).

Les autres caractéristiques (densité, limites d'Atterberg, résistance à la compression simple) sont également très voisines de celles du limon de type "A" (tableau 77). Seule, la teneur en carbonate peut être très différente (7,9% pour l'éch. nº 4).

2. Le niveau argilo-limoneux.

Tous les éléments sont inférieurs à 100 µ , mais la granulométrie est très étalée. Le pourcentage d'argile est de 23% environ (tableau 76).

La teneur en carbonate est remarquablement forte (16,6 à 32,8%).

La porosité est forte (n = 42%, e = 0,73, d = 1,57) mais peu différente des valeurs moyennes des limons situés directement sous la terre végétale (Cf § III,C,3º).

Les caractéristiques géotechniques (tableau 78) sont voisines de celles des limons décarbonatés de type "B".

On retrouve aini dans les deux couches de la séquence 3, des niveaux très semblables à ceux du limon décarbonaté, avec cependant les deux différences suivantes :

- la teneur en carbonate est beaucoup plus élevée,
- il existe dans le thalweg un classement (type "B" sur type "A") qui n'était pas décelable sur le plateau (Cf. p.71)

d) Le niveau de limon.

Entre la séquence 2 et la séquence 3 existe un limon plus homogène, non classé, qui recouvre tout le versant ouest du thalweg sur une épaisseur pouvant atteindre 4 m. Quand il n'est pas recouvert par la séquence 3, il est surmonté par un sol brun. Sa partie inférieure est mélangée avec les marnes de la séquence 2. Au contraire, le contact avec le sable de Beauchamp est franc.

La granulométrie (tableau 79) est celle d'un loess (prédominance de la fraction 80 - 20 µ). La teneur en argile est de 24%. La teneur en carbonate est très faible (inférieure à 2%) sauf dans la zone de mélange avec les marnes sous-jacentes où elle peut atteindre 18%.

La porosité est assez forte (41% à 38%), surtout dans la partie supérieure.

Les caractéristiques géotechniques (tableau 80) sont très voisines de celles du limon décarbonaté de type "C". La courbe de l'essai à l'oedomètre est, à cet égard, caractéristique (tableau 81).

D. CONDITIONS HYDROLOGIQUES ET CLIMATIQUES.

1/ La nappe phréatique.

Il n'existe pas dans le calcaire de St Ouen de niveau statique franc. Par contre, les reconnaissances ont décelé des venues d'eau épisodiques dans ces niveaux. La première nappe réelle est contenue dans les sables de Beauchamp et s'appuie sur des niveaux plus imperméables dans la partie supérieure des marnes et caillasses. Une deuxième nappe se tient dans le calcaire grossier et la base des marnes et caillasses. La nappe supérieure doit s'écouler dans la nappe inférieure à travers les marnes et caillasses et les deux s'écoulent également latéralement.

Hormis dans le thalweg de Mitry-Mory, ces nappes n'atteignent donc pas le niveau des limons et les importantes teneurs en eau de celui-ci ne sont dûes qu'à l'infiltration des eaux de pluie.

2/ Le ruissellement et les teneurs en eau.

Les ingénieurs de l'aéroport de Paris-Nord ont pu constater l'importance considérable du ruissellement remplissant très rapidement des fouilles entières d'eau et de particules argileuses en suspension. Ceci n'est pas récent. Les habitants de la région avaient baptisé, en effet, certains sites de noms évocateurs : "le Bateau", le "Petit Marais", la "Rivière souterraine" pour le thalweg nord-sud entre Roissy et Mitry-Mory, le "Pont de Paris" pour un pont actuellement détruit mais situé autrefois sur le thalweg de Mitry-Mory, dans une zone où ne coule actuellement aucun rû.

De plus, il a été établi par Cazabat, à la demande de l'aéroport de Paris-Nord, une carte des zones humides et des circulations

d'eau (Cf carte). Réalisée à partir de photos aériennes panchromatiques et infra-rouges, cette carte est en bonne correspondance avec la topographie du plateau et les observations de teneur en eau réalisées sur le terrain.

Les teneurs en eau varient donc en fonction de la topographie mais également de la saison et de la profondeur. Le tableau 82 indique des variations dans la zone humide. On y constate que l'influence de la saison y est considérable., les maximas étant atteints au mois de janvier. D'autre part, les teneurs en eau passent par un minimum à 1m de profondeur et croissent quand la profondeur augmente.

En moyenne, sur le plateau, les teneurs varient de 20 à 24% sur les carbonates et 21 à 26% sur le limon carbonaté.

Les conditions de gel sont semblables à celles du plateau d'orly (Cf § II,D).

E. CONCEPTION DES OUVRAGES : FONDATIONS ET TERRASSEMENTS.

L'ordre des problèmes invoqués dans ce chapitre est celui du chapitre correspondant (II E) relatif au plateau d'Orly.

1/ Les fondations.

a) Fondations pour constructions.

1. Les études précédentes permettent de distinguer trois groupes principaux de limons :
   - le lehm,
   - le loess carbonaté,
   - le limon décarbonaté et les zones de mélange avec le substratum.

Deux critères permettent de les distinguer assez rapidement : la teneur en carbonates et la densité sèche. Cependant, à la différence du plateau d'Orly, ces zones ne sont pas délimitées avec précision. Il existe souvent un passage continu de l'une à l'autre.

2. Les remarques préliminaires énoncées à propos du limon d'Orly restent intégralement valables pour celui de Roissy :
   - aucun essai de portance ne se justifie sur le lehm,
   - on ne peut baser un calcul sur des essais réalisés à teneur en eau faible,
   - la représentativité des essais en laboratoire dépend de l'homogénéité,
   - le choix des essais est important.

3. Propriétés des différents groupes.

α) Le loess carbonaté.

La saturation ne présente plus les mêmes dangers que pour le loess d'Orly. En effet, le coefficient de Feda (Cf § IV) reste toujours en dessous de la limite critique 0,85.

La cohésion apparente Ca aux teneurs en eau les plus défavorables atteint 0,5 à 0,6 T/m2. Soit une pression limite de l'ordre de 25 à 30 T/m2 et un taux de travail de 0,8 à 1,0 bar.

$$\tau = 0{,}8 \text{ à } 1{,}0 \text{ bar.}$$

Ce taux de travail est, la plupart du temps, inférieur à la pression de consolidation Pc. Les tassements seront faibles et, facteur favorable, instantanés (sol non saturé).

β) le limon décarbonaté.

Beaucoup plus hétérogène que le précédent, les résultast sont plus dispersés. On peut cependant remarquer que la cohésion apparente Ca est légèrement plus forte, à teneur en eau égale, que celle du loess carbonaté. Cependant, en moyenne, ce limon est plus humide que le précédent, ce qui conduit à un taux de travail très comparable à celui du loess carbonaté :

$$\tau = 0{,}8 \text{ à } 1{,}0 \text{ bar.}$$

Le tassement est variable et dépend de l'indice des vides initial. Quand le limon est peu dense ($e_o > 0{,}60$) il existe une pression de consolidation Pc et un coefficient de compressibilité assez élevé. La part de tassement instantané est encore considerable .

Au contraire, les densités fortes ($e_o < 0{,}55$) caractérisent une couche peu compressible ($Cc \simeq 0{,}1$) mais sans pression de consolidation Pc.

4. Les différentes zones de fondations.

Il ne m'est pas possible de délimiter en plan et avec précision les différentes couches distinguées précédemment, car le passage

est souvent continu de l'une à l'autre. D'autre part, l'hétérogénéité du limon décarbonaté en fait une couche géotechnique imprécise. Chaque projet doit donc faire l'objet d'une étude spéciale comportant en particulier les mesures de teneur en eau et de la densité.

On peut cependant faire quelques remarques cartographiques générales :

- le loess carbonaté représente une faible part de la superficie du dépôt.
- les thalwegs contiennent toujours du limon décarbonaté.

b) Fondations pour chaussées.

L'indice CBR du limon en place, qu'il soit carbonaté ou non, est, aux teneurs en eau naturelles, très faible : 2 à 5%.

2/ Les tassements.

La teneur en eau naturelle dépasse, pendant presque toute l'année et quel que soit le limon, la limite de plasticité. Les terrassements sans traitement spécial seront donc difficiles.

a) les déblais.

Sauf cas exceptionnels, l'anisotropie de perméabilité et la perennité des talus verticaux qui en est la conséquence, n'existent pas dans ce limon. Il est alors souhaitable, compte-tenu du ruissellement considérable (effet de peau) d'adopter des pentes de talus faibles (3/2 au minimum).

b) les remblais.

1. remblai de remplissage.

Le limon, très délicat de mise en oeuvre, et souvent trop argileux, constitue un remblai de remplissage de qualité moyenne, voire mauvaise.

2. Remblai de fondation.

Il n'a pas été tenu compte, dans les essais Proctor réalisés pour les chantiers de l'aéroport, des distinctions précédemment établies entre loess carbonaté et limon décarbonaté. Il ne m'est donc pas possible de différencier leurs propriétés. Je citerai seulement quelques résultats moyens obtenus sur le plateau :

α) Le compactage .

W % opt PN se situe aux environs de 17 à 18% (tableau 83) avec d. opt PN = 1,70. Cette teneur en eau n'est que très rarement atteinte (dans la couche superficielle, pendant de courtes périodes

d'été). C'est avant tout pour résoudre ce problème que les ingénieurs de l'aéroport de Paris-Nord ont décidé l'utilisation du traitement à la chaux.

β) La portance des remblais.

En moyenne, pour un optimum Proctor Normal de 18% et une compacité maximale de 1,75, la résistance apparente du matériau est de l'ordre de 1 bar environ à l'optimum + 3% et croit apidement lorsque la teneur en eau décroit/

La compressibilité est d'autant plus élevée que la teneur en eau de mise en oeuvre est plus élevée.

L'indice CBR ne dépasse pas 5% après imbibition de 4 jours.

Pour les remblais d'une grande hauteur, la teneur en eau pour obtenir le minimum de résistance acceptable se situe à la limite inférieure des teneurs en eau naturelles. Les pentes peuvent être réduites (2/1), mais la solution la plus satisfaisante demeure, dans ce cas également, le traitement du limon à la chaux.

En conclusion, on peut admettre, sur limon non traité et en place, un taux de travail au moins égal à 0,8 bar. Les tassements sont très variables et doivent être étudiés dans chaque cas particulier. L'affaissement à saturation n'est cependant plus à craindre.

Pour les chaussées et les remblais de grande hauteur le traitement du limon à la chaux est très souhaitable.

F. CONCLUSIONS ET ESSAIS DE RECONSTITUION GENETIQUE.

La granularité des différents limons du plateau de Roissy démontre que le matériau est d'origine éolienne. Cependant, à la différence du plateau d'Orly, certaines zones furent considérablement remaniées.

Le limon carbonaté est homogène. Aucune stratification n'est possible. Les courbes cumulatives sont incluses dans un fuseau étroit et caractéristique (tableau 46). Seule, la teneur en carbonates est variable.

Ce dépôt correspond donc à un loess qui n'aurait subi aucun remaniement sensible hormis une légère décarbonatation par endroits. La teneur en argile, beaucoup plus forte que celle du loess d'Orly (correction faite des différences de teneurs en carbonates) prouve que la zone de déflation dont est originaire ce loess n'est pas la même que celle d'Orly. Une étude de minéraux lourds, effectuée par J.P. MICHEL (1972) sur une coupe de l'aérogare a donné les résultats suivants :

Minéraux	1m	2m	3m
Tourmaline	5	10	29
Zircon	75	75	52
Rutile	9	9	12
Anatase	1		
Sphène			2
Corindon			
Grenat	2		
Andalousite			
Staurotide	4	1	
Disthène	4	5	5
Hornblende			
Epidote			

La proportion forte de zircon et de Tourmaline que ne possède pas les loess du nord et du l'ouest de l'Oise (Epidote, Hornblende , Grenat) peut laisser penser qu' une partie du materiau aurait son origine dans le limon fluviatile des breges de ce fleuve .Des determination plus nombreuses seraient nécessaire pour justifier cette hypothèse.

La proportion plus faible dede tublures calcaires de typel (concrétions résistantes) indique que les conditions pédologiques au moment du dépot devraient légérement différentes de celles d'Orly .La lehmification du dépot semble par contre avoir atteint le même stade (sol brun léssivé) .

Le limon décarbonaté est trés différent.Son aspect est hétérogène en coupe et de fortes différences de granularité l'affectent. Il apparait difficile d'en faire un de dépot d'âge différent du loess carbonaté, étant donné les passages latéraux et souvent continus du dépot carbonaté à celui entierement décarbonaté. Il s'agit plus probablement du même materiau, mais profondement remanié par circulation d'eau et ,peut être solifluxion (Thalweg de Mitry- Mory). Les quelques constations suivantes, d'ordre morphologique, hydrogéologiques, et structurales semblent étayer cette hypothèse .

a) Morphologie.

La carte de situation des dépôts carbonatés et décarbonatés (Cf carte) montre en effet que le limon décarbonaté est completement absent des thalwegs et des zones de grande circulation d'eau .

De plus , si l'on superpose cette carte et celle des zones de teneurs en eau de Cazabat (Cf carte), on constate que les zones ôu les carbonates sont absents sont celles à forte teneut en eau .Cette conclusion , liée à celle de la constance du réseau hydrographique (Cf § III,B, 2)prouve l'antériorité des circulation d'eau par rapport à la décarbonatation .

b) Hydrologie.

Les teneurs en eau (Cf § III,D) sur le plateau de Roissy sont beaucoup plus élevées que sur celui d'Orly. Le ruissellement a été et demeure considérable (Cf chapitre : conditions hydrologiques, § III,D).

c) Structure.

Le remaniement du loess par saturation entraine l'affaissement de sa structure aérée et la diminution de la porosité. C'est le cas du limon décarbonaté beaucoup moins poreux que le loess carbonaté (Cf § III,C,2º).

D'autre part, la mobilité des particules fines est remarquable comme le prouve l'expérience suivante. Entre les deux pierres poreuses d'un oedomètre, j'ai crée une circulation d'eau en branchant le tuyau de sortie sur une pompe à vide. Le courant d'eau s'obscurcit très rapidement de fines particules détachées du loess et qui avaient traversé la pierre poreuse.

Ainsi, le plateau de Roissy fut donc le siège, pendant de longues périodes, d'un intense ruissellement. C'est à lui que l'on doit la décarbonatation puis la remise en mouvement des particules argileuses pendant et après le dépôt du loess. Seuls, quelques ilots furent préservés. Ils contiennent actuellement le loess carbonaté.

Du point de vue géotechnique, ce remaniement irrégulier latéralement et verticalement a crée des zones à limites imprécises et un matériau hétérogène. Toutefois, aux teneurs en eau naturelles, le limon décarbonaté n'a pas perdu toute cohésion et sa résistance, comme celle du loess carbonaté, demeure supérieure à beaucoup de celles d'autres formations superficielles. De plus, la densification consécutive à ces circulations d'eau est un facteur favorable car la compressibilité en est réduite.

La structure du loess carbonaté, comme celle du limon décarbonaté n'est pas sujette à l'affaissement par saturation. La teneur en argile élevée qui est la cause de cette amélioration (Cf coefficient de Feda, § IV) donne toutefois au limon une forte plasticité. Celle-ci, aux teneurs en eau naturelles élevées qui sont celles du plateau, en fait un matériau difficile à mettre en oeuvre et oblige, dans beaucoup de cas, à avoir recours au traitement par la chaux (compaction, remblais).

IV

CORRELATIONS CARACTERISTIQUES-PROPRIETES GEOTECHNIQUES

IV. CORRELATIONS CARACTERISTIQUES-PROPRIETES GEOTECHNIQUES.

Ce chapitre comprend l'étude de quatre propriétés des limons; la plasticité, la perméabilité, la résistance à la compression simple et la compressibilité. Les essais déterminant d'autres propriétés (triaxial pour la cohésion et l'angle de frottement ; Proctor pour le compactage) n'ont pas été réalisés en assez grand nombre pour permettre une telle étude.

D'autre part, seules les caractéristiques quantitatives ont été mises en regard de ces propriétés (granulométrie, porosité ou indice des vides, teneur en eau).

A. LA PLASTICITE

On détermine la plasticité d'un sol par la méthode d'Atterberg (Cf annexe 3). Le mode opératoire entraine le remaniement complet de l'échantillon et détruit sa structure.

De plus, dans le cas des limons du plateau, ce mode conduit à faire l'essai sur un échantillon pratiquement décalcifié. On effectue, en effet, les mesures sur la fraction inférieure à 50 µ et le calcite se trouve en presque totalité sous forme de tubulures de diamètre supérieur à 50 µ .

La plasticité est définie par deux limites : celle de la plasticité (Wp) et celle de liquidité (Wl) et un indice, celui de plasticité (Ip) qui est la différence $W_l - W_p$. Les classifications géotechniques de génie civil utilisent Wl et Ip (Cf diagrammes de Cassagrande tab. 9 et tab. 49) et ce sont les variations de ces deux grandeur en fonction de la composition qui font l'objet de cette étude.

Des résultats obtenus sur les limons des deux plateaux peuvent être tirées les conclusions suivantes :

1) la limite de liquidité et l'indice de plasticité Ip ne sont pas indépendants.
En première approximation, les relations liant ces grandeurs sont linéaires :

pour Orly (tabl 84) 38 échantillons, coefficient de corrélation 0,956

$$W_l = 0,75\ Ip + 23,9$$

pour Roissy (tab. 85) 40 échantillons, coefficient de corrélation 0,926

$$W_l = 1,05\ Ip + 15,6$$

2) l'indice de plasticité Ip croit avec la teneur en argile :
Cette relation est également linéaire :

pour Orly (tab.86) 24 échantillons, coefficient de corrélation 0,931

$$Ip = 0,93\ d_2 + 1,9$$

pour Roissy (tab.87) 22 échantillons, coefficient de corrélation 0,729

$$Ip = 0,43\ d_2 + 11,3$$

Ce qui conduit, pour W_l et Wp aux relations suivantes :

Orly : $W_l = 0,69\ d_{2\mu} + 25,3$
$Wp = 0,23\ d_{2\mu} + 23,4$

Roissy : $W_l = 0,45\ d_{2\mu} + 27,5$
$Wp = 0,02\ d_{2\mu} + 16,2$

Compte tenu de la précision des mesures des limites (0,5 à 1%) la limite de plasticité varie donc très peu en fonction de la teneur en argile. La limite de liquidité croit linéairement en fonction de cette teneur et l'indice de plasticité suit donc la même loi.

Les différences entre le plateau d'Orly et celui de Roissy peuvent provenir de la composition minéralogique et des cations échangeables, mais je ne possède pas assez de données chiffrées de ces

caractéristiques pour établir l'influence quantitative de ces paramètres. La proportion de Montmorillonite, beaucoup plus plastique, doit cependant jouer un rôle important.

Remarque :

La précision des mesures devient très faible quand la teneur en argile est faible (d_2 μ inf à 5%) et il ne serait donc pas représentatif d'extrapoler ces relations en dessous de cette teneur.

Tableau N° 84

ORLY ;

Variation de Ip en fonction de WL

Coefficient de corrélation = 0,956

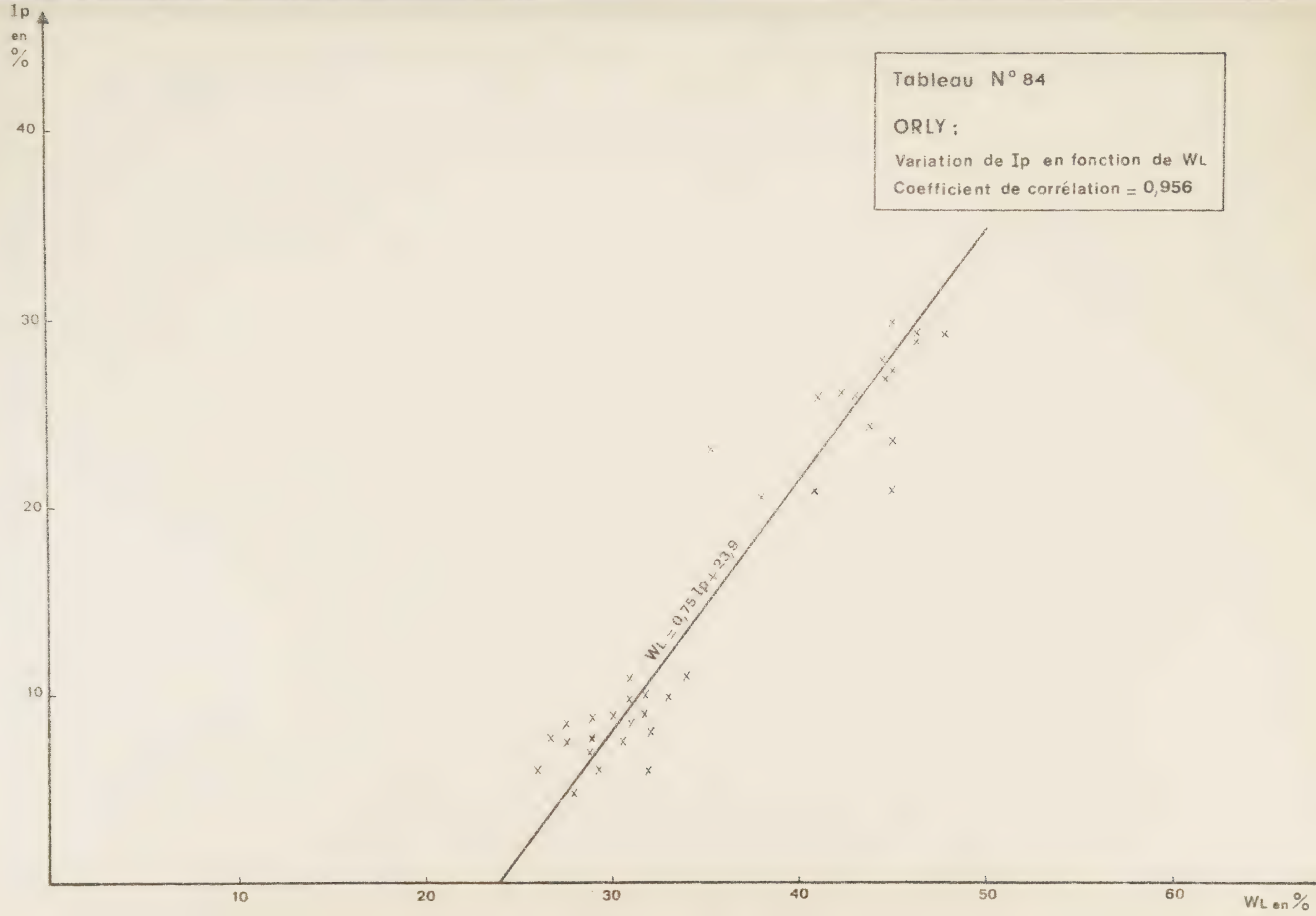
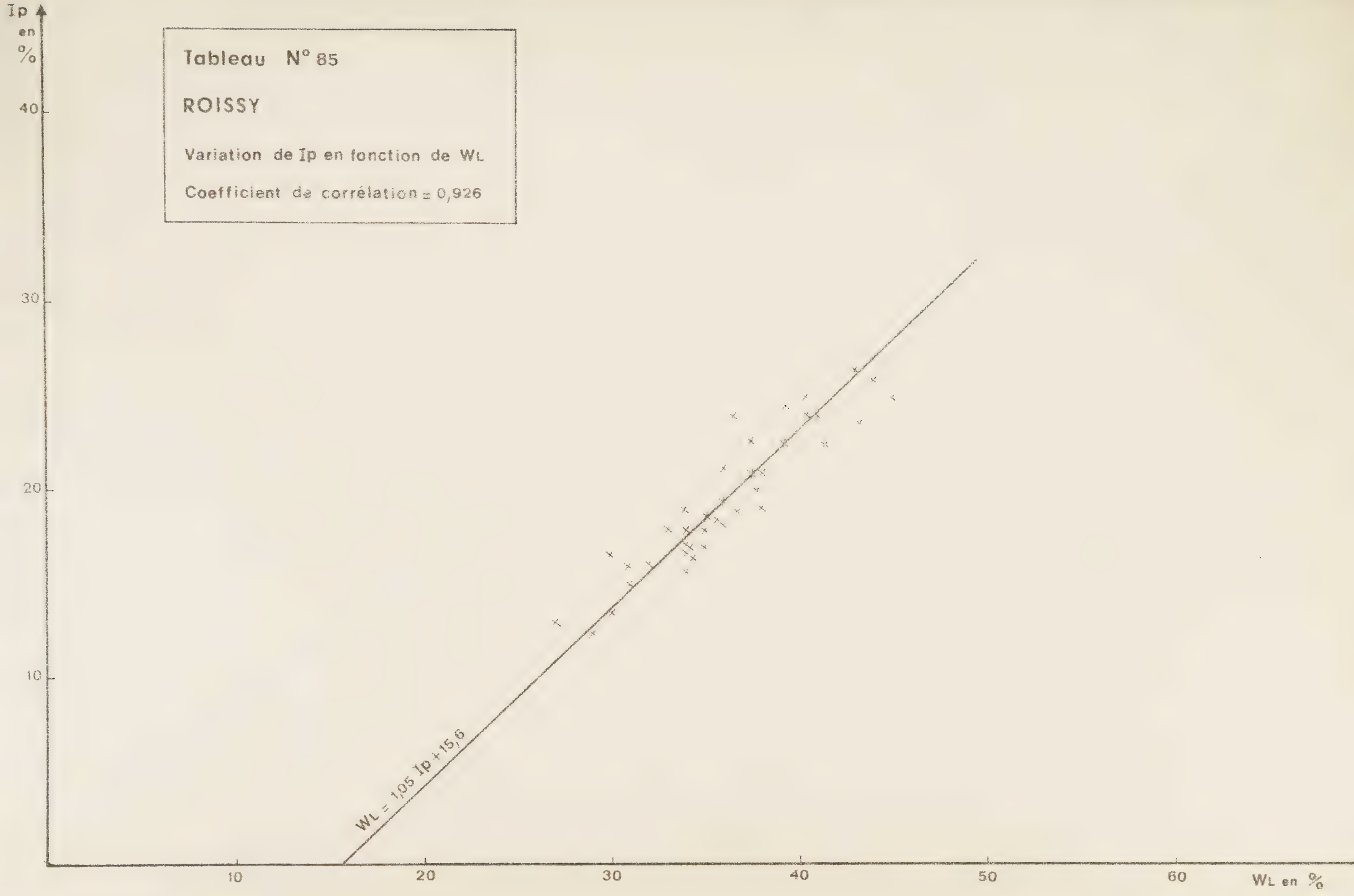


Tableau N° 85

ROISSY

Variation de Ip en fonction de W_L

Coefficient de corrélation = 0,926



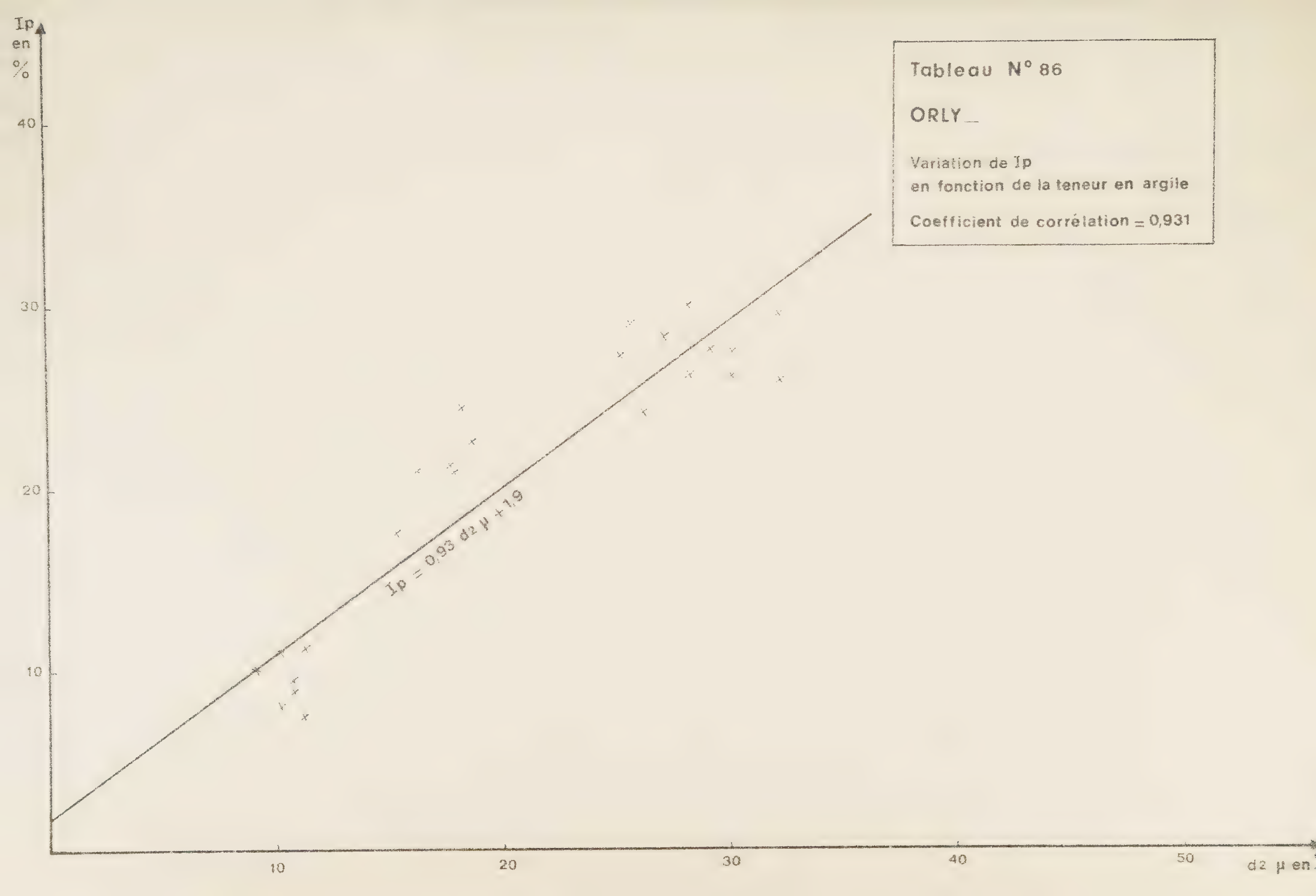


Tableau N° 86

ORLY_

Variation de Ip
en fonction de la teneur en argile

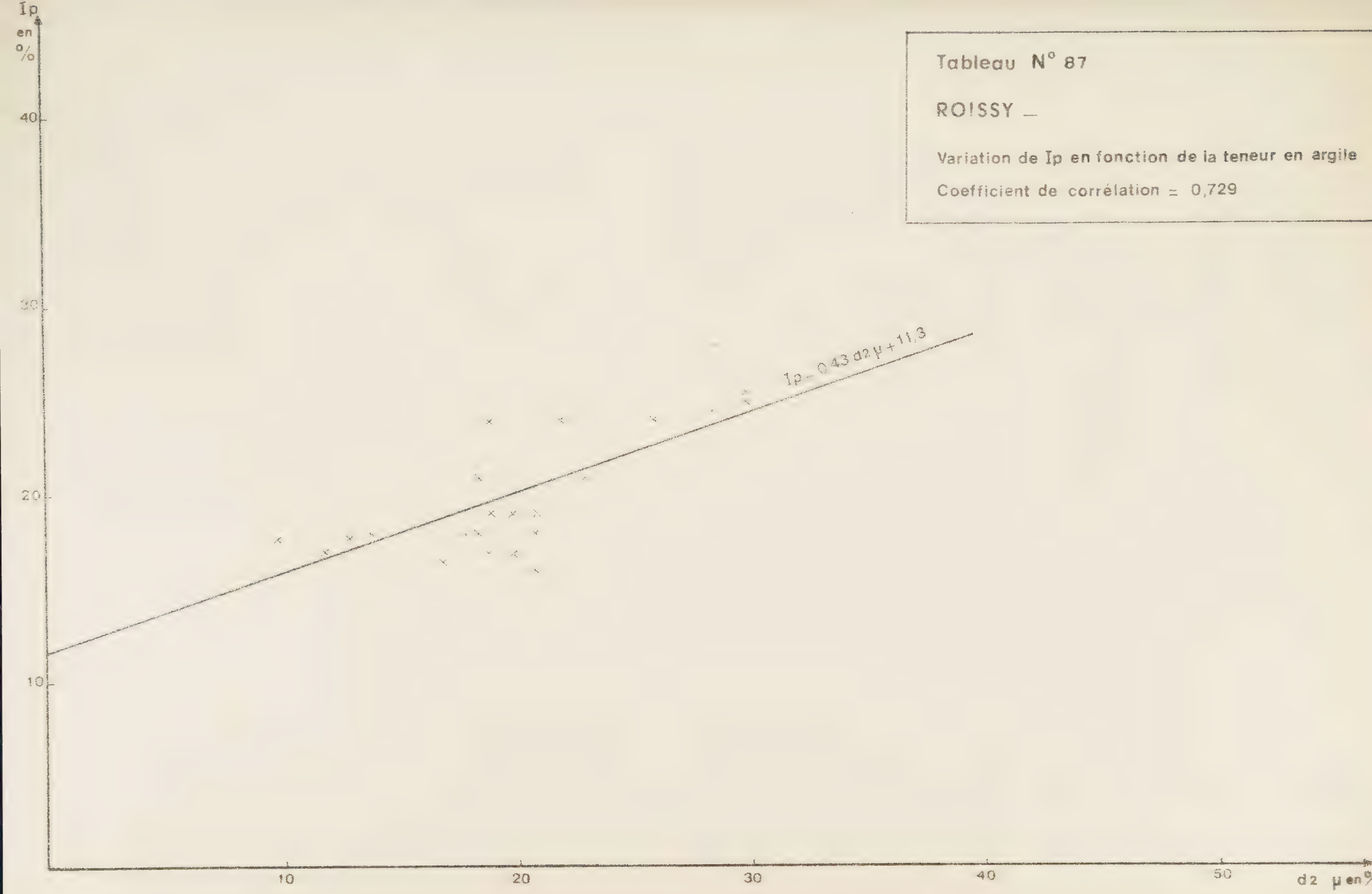
Coefficient de corrélation = 0,931

Tableau N° 87

ROISSY —

Variation de Ip en fonction de la teneur en argile

Coefficient de corrélation = 0,729



B. LA PERMEABILITE.

Elle est définie par le coefficient K (vitesse d'écoulement en m/s). Toutes les valeurs mesurées sont celles de la perméabilité verticale. Pour cette propriété, les limons se classent en deux catégories :

- la première contient le limon ss et le loess sableux d'Orly. Le coefficient K y varie peu d'un échantillon à l'autre -(10^{-7} à 5 x 10^{-7} m/sec) et vaut, en moyenne, 2 x 10^{-7} m/s.
- La seconde comprend tous les autres types. Le coefficient K est compris entre 10^{-10} et 5 x 10^{-9} m/s. J'ai étudié, à l'intérieur de cette catégorie, les relations entre K et la granulométrie d'une part, et la porosité globale d'autre part. A la précision des mesures, K n'apparait lié à aucune de ces grandeurs. Il est cependant probable que des mesures plus fines de la porosité tenant compte en particulier de la taille des pores et de leur disposition (porosité fermée ou ouverte) se révèleraient fructueuses dans ce domaine.

Par contre, la différence importante entre les deux catégories provient des tubulures de calcite qui ne sont présentes, intactes que dans le loess ss et dans le loess sableux et qui créent un système de drains verticaux augmentant la perméabilité. Si l'on mesure la perméabilité horizontale de ces loess, elle se révèle, en effet, très voisine de celle de l'autre catégorie (K = 4x10^{-9} m/s).

C. RESISTANCE A LA COMPRESSION SIMPLE.

Pour chaque catégorie de limon, j'ai étudié les variations de Rc en fonction de la teneur en eau. Les caractéristiques de ces corrélations sont réunies sur les tableaux 13,20,29,35,54,63,70 et 71.

Sauf dans la partie supérieure du lehm de Roissy, les coefficients de corrélation et les intervalles de confiance sont satisfaisants compte tenu de la précision des mesures. On peut en déduire les enseignements suivants :

1/ La résistance à la compression simple décroit quand la teneur en eau croit.

Pour chaque catégorie et dans l'intervalle des teneurs en eau naturelles, cette variation est linéaire :

$$Rc = -A (W - W^{\circ})$$

Rc = résistance à la compression simple

W = teneur en eau

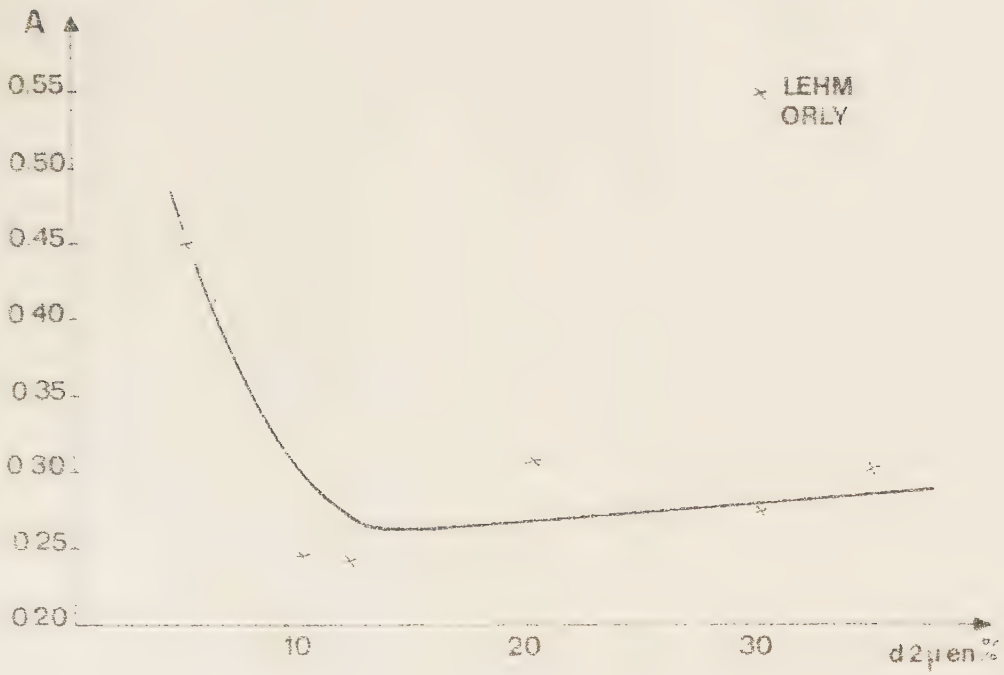
A = pente de la droite : je la dénommerai "coefficient d'affaiblissement"

W° = teneur en eau minimale de résistance nulle.

Cette représentation est préférable à la forme Rc = -AW + B car la valeur B représente la résistance à teneur en eau nulle, état qui n'est jamais atteint ni même approché dans les conditions normales (naturelles et durant les chantiers). La valeur W° est, au contraire, voisine des teneurs en eau naturelles et marque, de plus, la limite de résistance du matériau et peut être utilisée par l'ingénieur.

a) Le "coefficient d'affaiblissement" (A).

Il décroit quand la teneur en argile croit de 0 à 10%, puis reste constant (0,3 environ) pour les teneurs supérieures (tab 88). Le point représentatif du lehm d'Orly se situe très à l'écart.



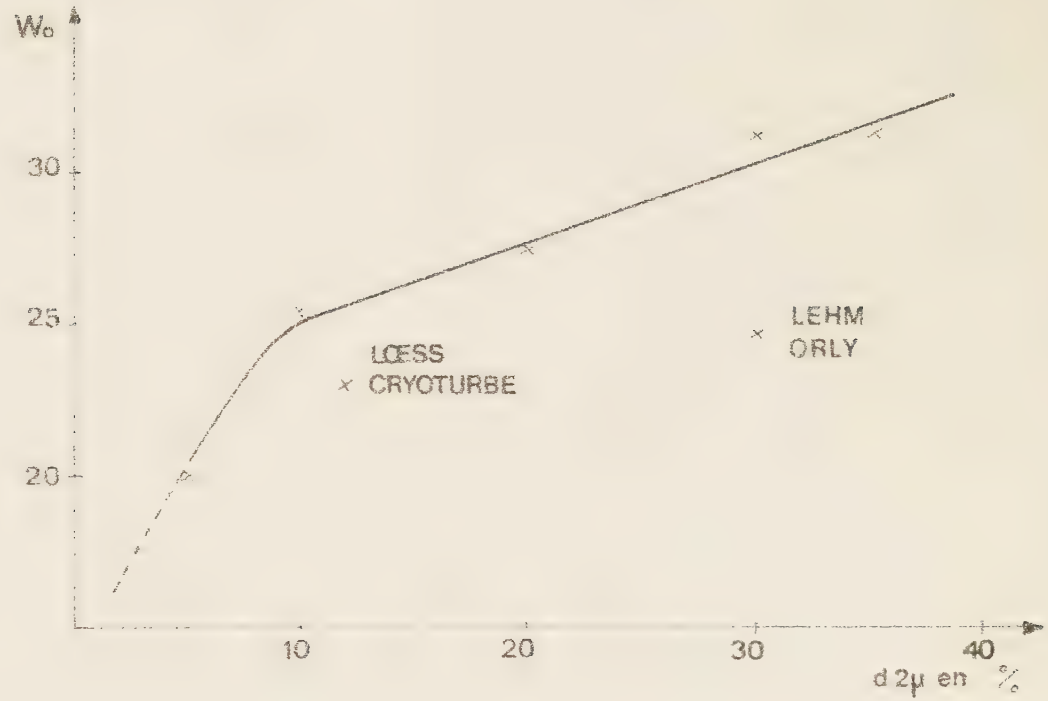


Tableau N° 88

Résistance à la compression simple

Variation de A et W_o en fonction de la teneur en argile.

b) la teneur en eau minimale de résistance nulle (W°)

Elle croit avec la teneur en argile, la teneur 10% marquant un changement de pente (tab. 88). Les points représentatifs du mélange loess-marno-calcaire et du lehm d'Orly sont également en dehors de cette courbe.

c) En conclusion, à teneur en eau donnée, la résistance à la compression simple croit avec la teneur en argile.

Le tableau 89 représente une synthèse des variations de A et de W'. Les courbes de variation de Rc en fonction de la teneur en argile sont composées de deux parties :

- jusqu'à une certaine teneur en argile (variable avec la teneur en eau) une croissance rapide de la résistance. Pour des teneurs en eau comprises entre 16 et 26%, cette teneur limite est assez constante et vaut environ 10%.
- au-delà une croissance plus lente et linéaire de la résistance. La pente de ces droites varie peu (0,060 à 0,075)

Au-delà de 26% de teneur en eau, si l'allure de la courbe reste la même, les valeurs changent assez rapidement. La pente linéaire débute à d_2 μ = 25%, la pente de la droite est beaucoup plus faible (0,01).

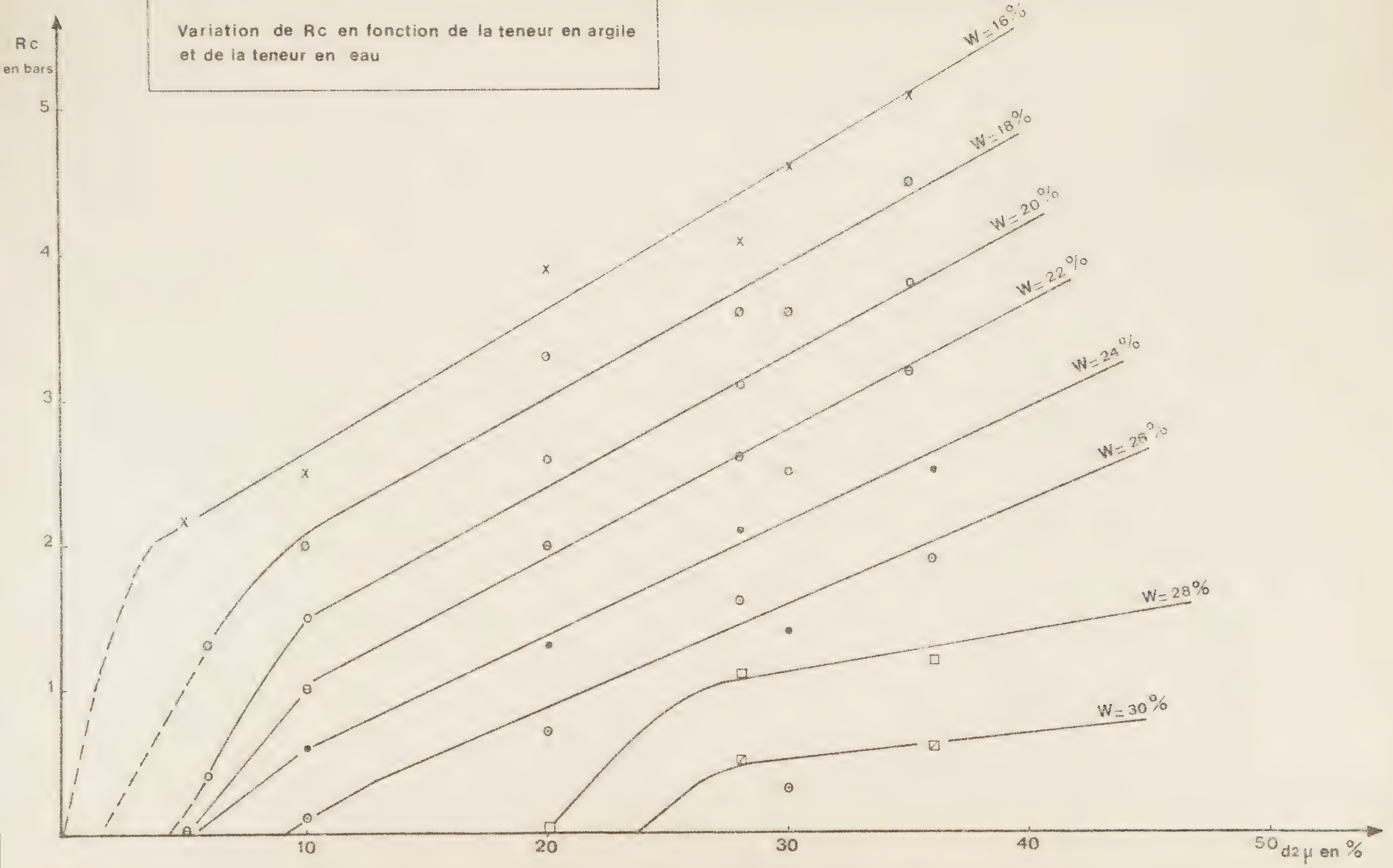
Cette teneur en eau correspond à un sol saturé de porosité n = 42,2% qui est, en moyenne, la porosité des limons étudiés.

Deux catégories de limons se situent très en dehors de ces graphiques : le mélange loess-marno-calcaire et le lehm d'Orly.

La particularité du mélange se situe seulement au niveau de la teneur en eau minimale W . Les essais de résistance à la compression simple sur sol hétérogène ont établis que la présence de petits blocs

Tableau N° 89

Variation de Rc en fonction de la teneur en argile et de la teneur en eau



centimétriques dans une matrice plus fine, crée des zones de faiblesse. Ce phénomène est sans doute à l'origine de la diminution de résistance du mélange.

Le lehm possède deux valeurs exceptionnelles : le "coefficient d'affaiblissement" A et la teneur en eau minimale de résistance nulle W^c. La structure particulière du lehm (structure prismatique, perméabilité faible, forte porosité) et la présence d'éléments végétaux peuvent être invoqués pour expliquer cette résistance faible .

D. LA COMPRESSIBILITE.

La compressibilité est définie par deux grandeurs déduites de la courbe de tassement à l'oedomètre : la pression de consolidation Pc et le coefficient de compressibilité Cc (Cf annexe 3).

1/ La pression de consolidation Pc.

Son comportement en fonction des caractéristiques du limon est très voisin de celui de la résistance de la compression simple. Il dépend en effet de la teneur en argile et de la teneur en eau.

a) La pression Pc décroit quand la teneur en eau croit.

Pour chaque catégorie de limons cette variation est linéaire (tab. 90 et 91), soit, en adoptant la même présentation que pour Rc :

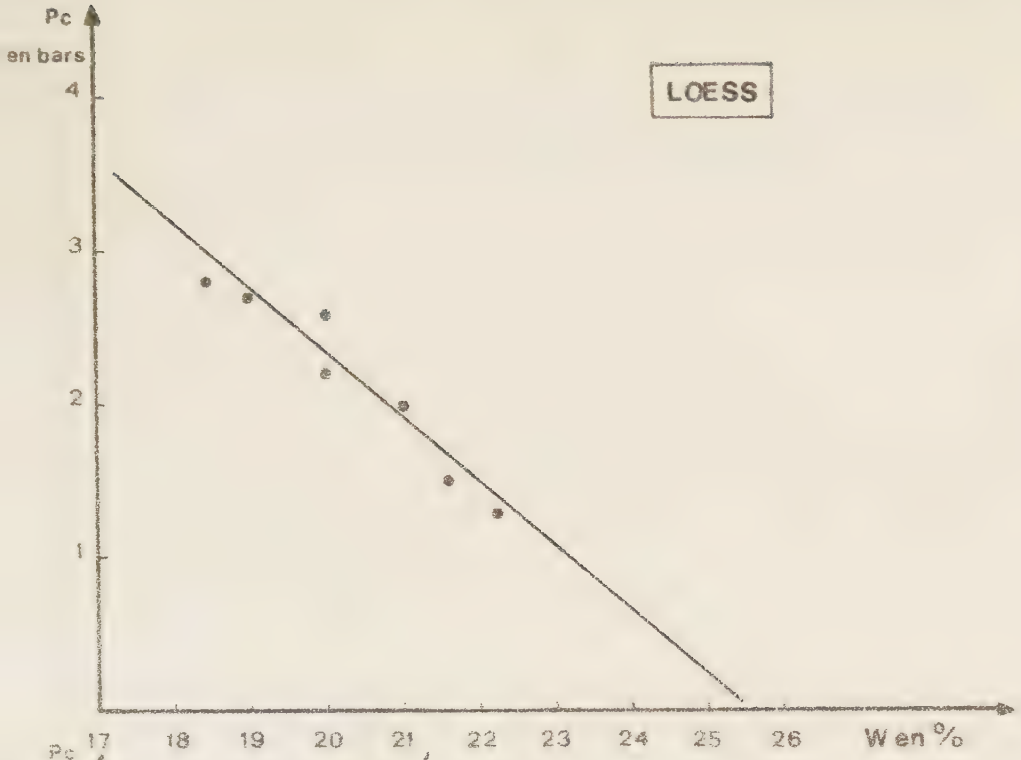
$$Pc = - a (W - W_1)$$

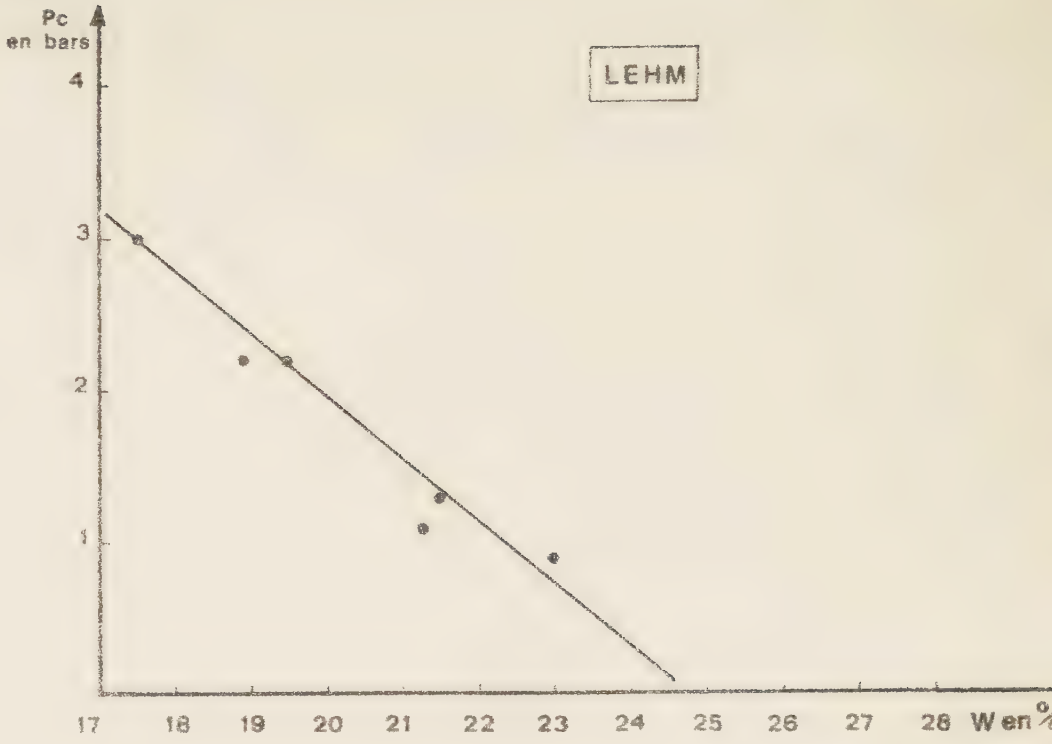
La pente de ces droites (a) varie peu d'un limon à l'autre (4,5 à 5,2). Par contre, W_1 croit en fonction de la teneur en argile (tab. 93).

En première approximation $W_1 = 0,4\ d_{2\mu} + 0,24$ pour $d_{2\mu} > 10\%$

b) A teneur en eau donnée, la pression de consolidation Pc croit avec la teneur en argile.

La synthèse des variations de a et de W_1 est réalisée dans le tableau 92. La variation de Pc en fonction de la teneur en argile y apparait linéaire entre 5 et 35% d'argile. Comme pour la résistance à la compression simple, le point représentatif du lehm se situe très à l'écart. Le mélange loess-marno-calcaire ne figure pas sur ce tableau car la mesure de la pression Pc pour ce limon est trop imprécise(Cf §V1,9





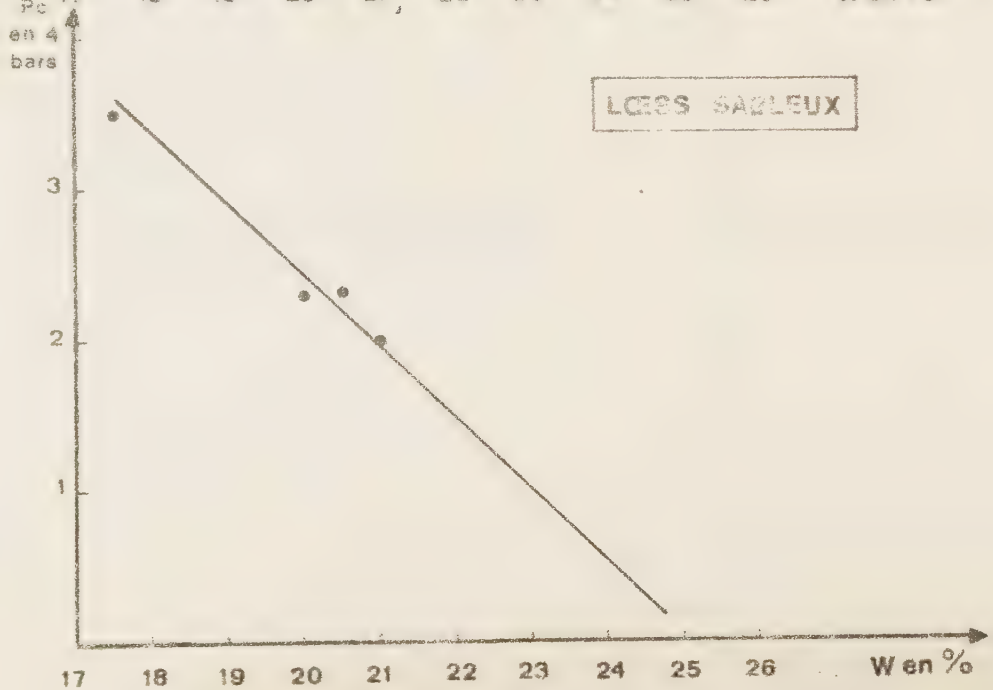
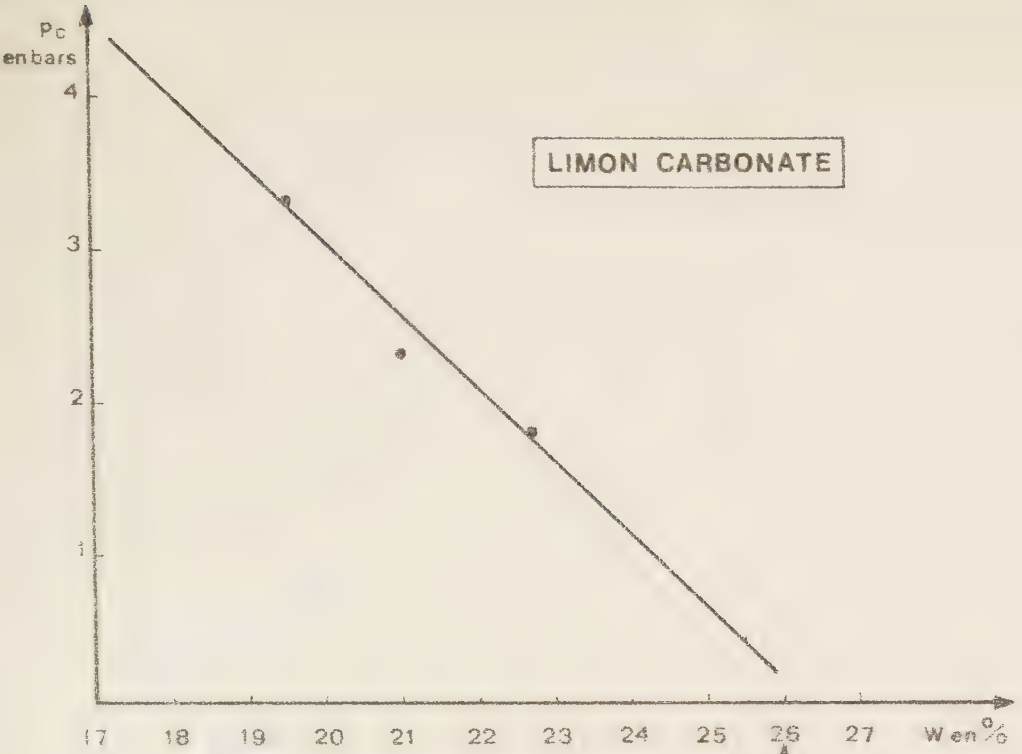


Tableau N° 90

ORLY

Variation de Pc en fonction de la teneur en eau



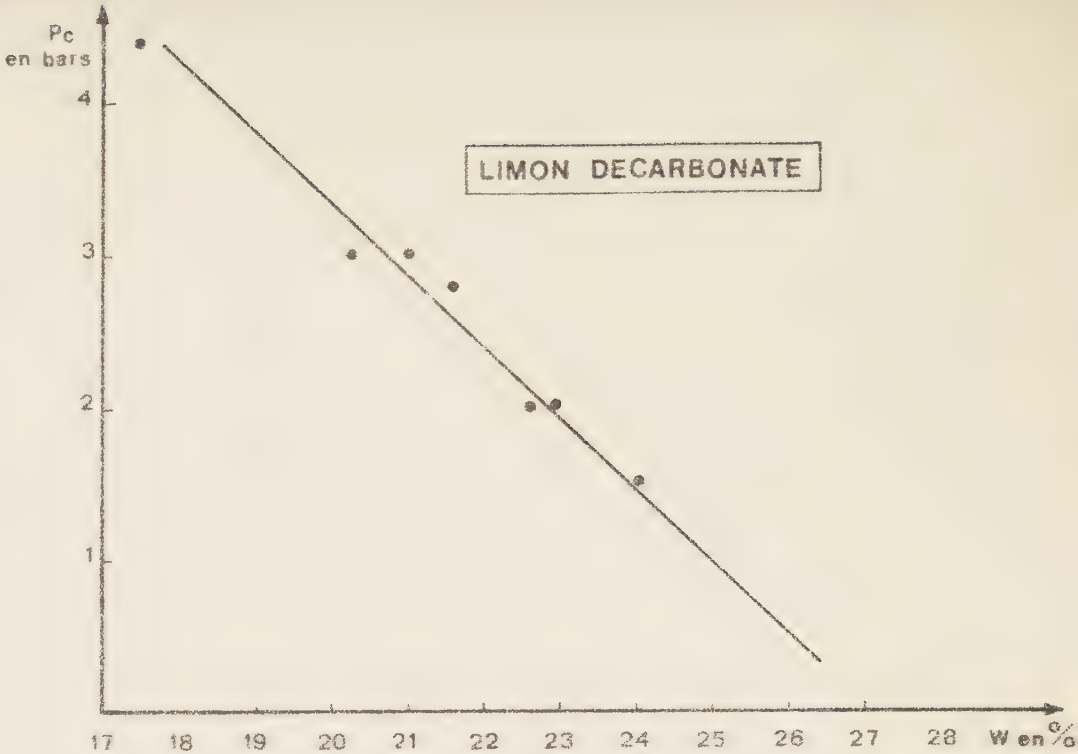
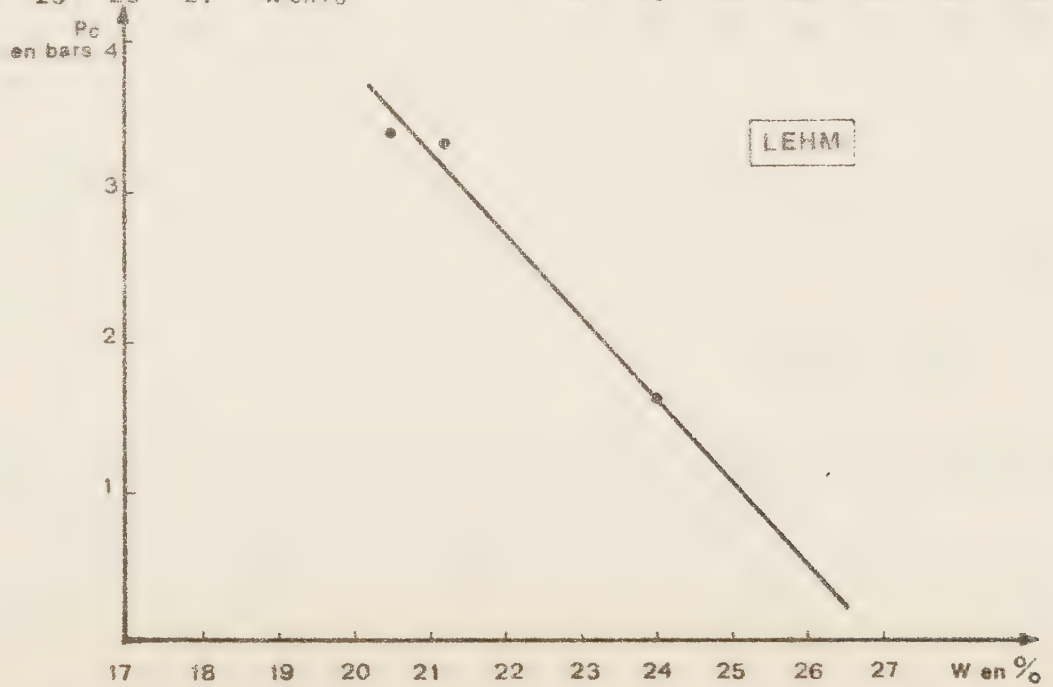


Tableau N° 91

ROISSY

Variation de Pc en fonction de la teneur en eau



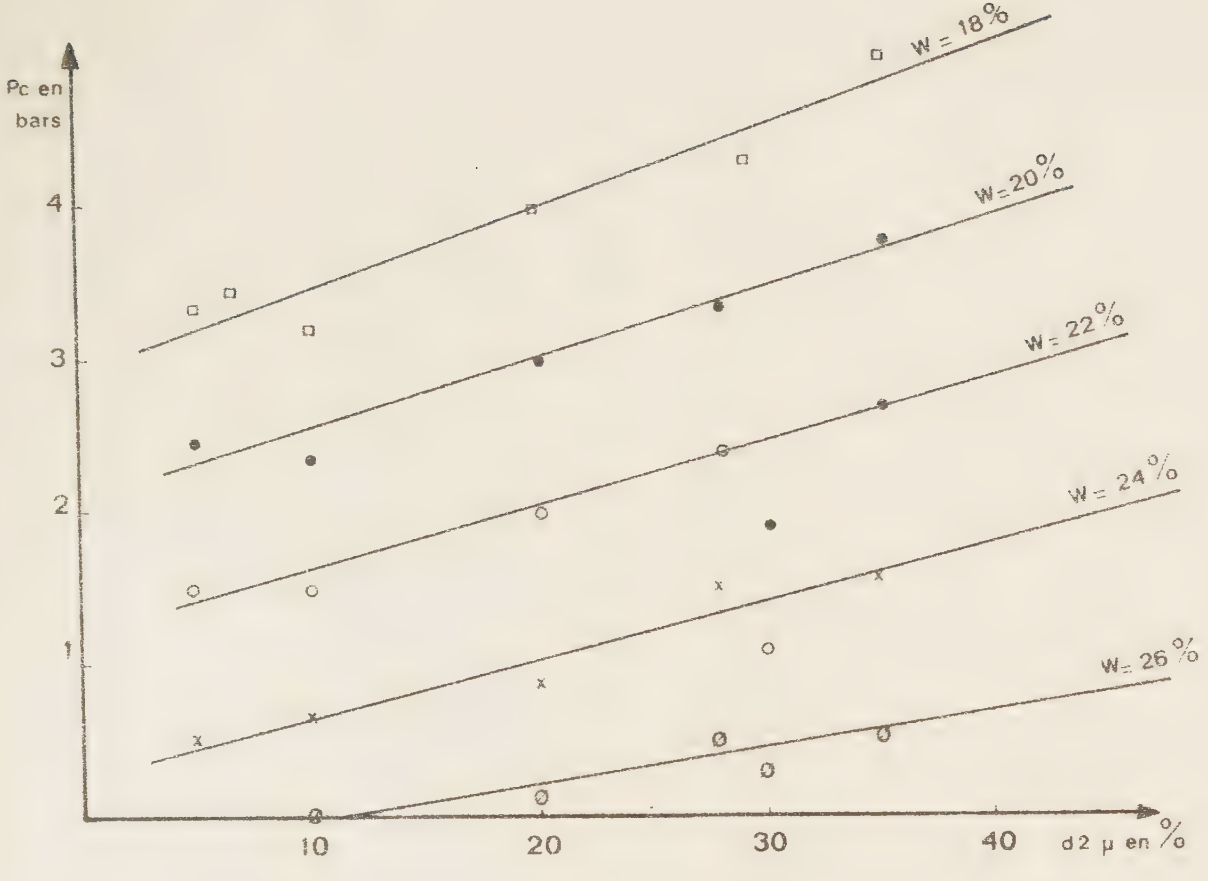


Tableau N°92

Variation de Pc en fonction de la teneur en eau et de la teneur en argile

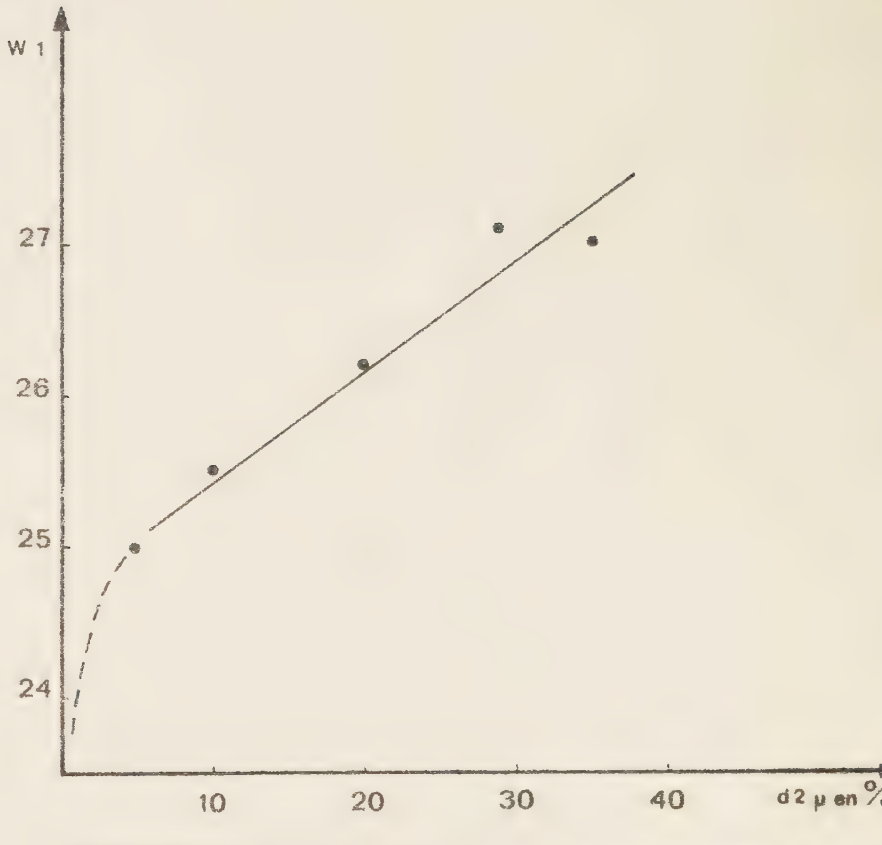


Tableau N°93

Variation de W1 en fonction de la teneur en argile

2/ Le coefficient de compressibilité Cc

a) Le coefficient Cc croit avec l'indice des vides (tabl 94), cette variation est linéaire en première approximation :

$$Cc = 0{,}80 \ (e - 0{,}43)$$

La pression Pc dépassée, le tassement sera donc d'autant plus grand que le sol sera plus poreux.

En réunissant les corrélations établies pour Pc et Cc, le tassement (exprimé par la variation de l'indice des vides Ae pendant la compression s'écrit :

$$\Delta e = Cc \log \frac{Pc}{P} \quad (1)$$

avec $Cc = 0{,}8 \ (e - 0{,}43)$

$Pc = -5 \ (W - W_1)$

$W_1 = 0{,}4 \ d_{2\mu} + 0{,}24$

P = pression exercée

W = teneur en eau

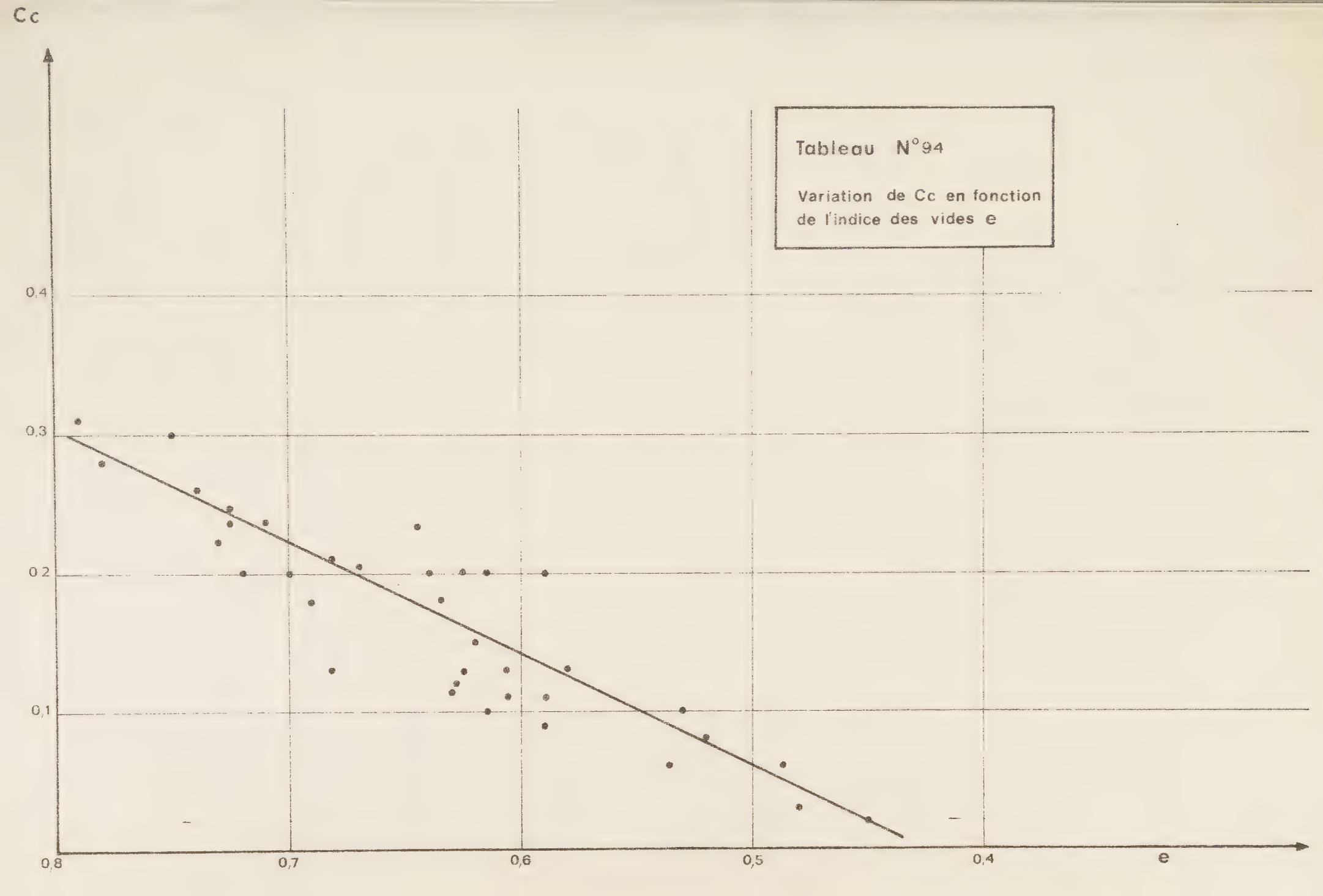
Pour une pression donnée P, le tassement sera donc d'autant plus grand que :

- la teneur en eau sera élevée,
- la teneur en argile sera faible
- le sol sera plus poreux.

Cette nouvelle formulation du tassement des limons permet alors d'aborder deux des problèmes géotechniques des loess, l'affaissement à saturation et la sur-consolidation.

b) L'affaissement du loess à saturation.

Dès les premiers travaux de Génie Civil sur le loess (Cf historique des recherches sur le loess, § I,B) on s'était aperçu de l'affaissement souvent brutal qu'entrainait la saturation. Le critère d'affaissement proposé par Feda (1966) et qui semble actuellement confirmé par de


Cc
Tableau N°94
Variation de Cc en fonction de l'indice des vides e
0,4
0,3
0,2
0,1
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
e

nombreux essais est le suivant : le loess s'affaissera à saturation si le coefficient K_L est supérieur à 0,85 K_L étant défini par

$$K_L = \frac{e_o - e_p}{e_1 - e_p}$$

e_o indice des vides in situ
e_p indice des vides d'un sol saturé pour $W = W_p$
e_1 indice des vides d'un sol saturé pour $W = W_1$

Ce critère ne tient pas compte de la teneur en eau naturelle. Il faut cependant remarquer que les loess pour lesquels ce critère a été vérifié avaient des teneurs en eau in-situ très faibles (de l'ordre de 2 à 7%).

La formule du tassement (1) définie précédemment tient compte de la teneur en eau. Si on l'applique pour calculer la différence de tassement entre un sol à teneur en eau faible et un sol saturé, on obtient les résultats suivants (pour une pression donnée de 2 bars) :

teneur en eau faible $\Delta e = 0$ car $P < Pc$
teneur en eau à saturation $W = Ws = \frac{e}{2,7}$

La variation de l'indice des vides à la saturation (Δe_s) est donc définie par :

$$\Delta e_s = Cc \log (0,92\ e + d_2 \mu + 0,6)$$

et en exprimant e en fonction de $d_2 \mu$ et de Δe_s :

$$e = 1,05\ d_2 \mu + 0,65 - 10^{-\frac{\Delta es}{0,8\ (e-0,43)}}$$

Un affaissement peut être jugé très important quand $\Delta e_s > 0,3$ le dernier terme est alors négligeable et le critère d'affaissement devient :

$$e = 1,05\ d_2 \mu + 0,65$$

Le critère de Feda peut également s'exprimer en fonction de la teneur en argile grâce aux formules établies au § A pour les limites d'Atterberg. On obtient :

$$e = 0{,}94\ d_2\ \mu + 0{,}67$$

Il existe donc, pour les teneurs en eau naturelles faibles, une bonne concordance entre le critère de Feda et la formule générale de tassement (1).

Pour des teneurs en eau plus fortes, l'affaissement est réduit et le critère de Feda n'est plus représentatif.

En conclusion, l'affaissement est une fonction croissante de la différence entre la teneur en eau naturelle et la teneur en eau à saturation. La plupart des loess calcaires ont des teneurs en eau faibles, ce qui explique les valeurs exceptionnellement élevées de l'affaissement à saturation. La formule (1) confirme le critère de Feda dans ce cas, mais, de plus, permet de calculer la veleur de l'affaissement quelque soit la teneur en eau et la pression exercée.

c) La sur-consolidation du loess.

Pour estimer la consolidation d'un sol, on compare la valeur de la pression de consolidation Pc au poids des terres sus-jacentes. Un sol est dit "sur-consolidé" quand Pc est supérieure au poids des terres, "sous-consolidé" dans l'autre cas. Pour que cette comparaison soit représentative, elle ne doit pas dépendre de la teneur en eau du sol qui peut varier avec les conditions atmosphériques. C'est pourquoi elle doit être calculée à saturation.

Certains essais, effectués dans des conditions normalisées, donc, en principe, sur un échantillon saturé, ont révélé une pression de consolidation Pc supérieure au poids des terres. Tel est le cas des essais sur le loessnsu-stricto d'Orly. Certains auteurs (Krinitzsky

etTUrnbull 1966) avaient découvert le même phénomène et l'avaient attribué soit à un ciment calcaire, soit au cycle assèchement-mouillage.

En fait, on constate que le tassement instantané (i) c'est-à-dire sans évacuation d'eau, est important(>50%) au début de l'essai. Ceci ne serait pas possible à saturation. L'essai normalisé qui consiste à maintenir l'échantillon en présence d'eau pendant quelques heures à 1 jour avant de le mettre en pression,ne conduit pas à une saturation réelle. Parler alors de "sur-consolidation" pour cet essai ne se justifie pas.

J'ai entrepris quelques essais à l'oedomètre en vérifiant avec soin les conditions desaturation de l'échantillon.

Un bloc de loess stricto-sensu formant un cube de 30 cm d'arête a été prélevé puis deux échantillons contigus découpés. L'un (ech A) est directement soumis a l'essai à saturation, l'autre (ech B) est maintenu pendant trois semaines dans l'oedomètre en présence d'eau puis mis en charge. Les courbes oedométriques sont très différentes. L'échantillon A présente une pression de consolidation de 2,9 bars que l'échantillon B ne possède pas. Deux autres essais réalisés dans les mêmes conditions ont donné des résultats analogues.

Le loess ss n'est donc pas sur-consolidé. Dans les essais normaux, où l'on n'introduit l'eau que quelques heures avant la mise en charge, il peut exister une pression de consolidation Pc car la saturation n'est pas encore complète. Les deux échelles de perméabilité (tubulures et"intrinsèques") sont sans doute à l'origine de cette lente progression de la saturation (Cf § II,C,1º).

E. CONCLUSIONS.

La teneur en éléments inférieurs à 2 µ joue donc un rôle fondamental. La plasticité, la résistance à la compression simple et la pression de consolidation à l'oedomètre en dépendent. C'est également par l'intermédiaire de ces particules argileuses que la teneur en eau intervient.

Ces résultats infirment donc de façon définitive l'hypothèse souvent avancée du rôle de la calcite comme armature, sous quelque forme que ce soit (tubulures jouant le rôle de piliers, ciment entre les grains). De tels liens ne pourraient être aussi sensibles à la teneur en eau. Une structure de grains liés uniquement par des ponts argileux dont la tenue dépend de la fixation de molécules d'eau entre les particules, est beaucoup plus satisfaisante.

Ce n'est qu'au niveau de la perméabilité que la calcite, quand elle est sous forme de tubulures seulement, modifie les propriétés du loess. Elles constituent un système complet de drains verticaux mettant la plupart de ces liaisons argileuses à l'abri d'une saturation rapide. Cette disposition permet au loess ss de posséder cette apparente pression de consolidation qui intriguait les géotechniciens.

La porosité n'intervient que pour le tassement, par l'intermédiaire du coefficient Cc. Le remainement naturel d'un limon diminuant sa porosité (Cf § III,C) on peut énoncer le critère suivant : toutes caractéristiques égales par ailleurs, un limon remanié naturellement sera moins compressible qu'un limon non remanié.

V

CONCLUSIONS GENERALES.

V. CONCLUSIONS GENERALES.

A la fin de la dernière période glaciaire, les vents d'ouest déposaient sur les plateaux d'Orly, et de Roissy du loess sur une épaissuer pouvant atteindre 7 à 8m. Dès son dépôt, les conditions hydrologiques et géomorphologiques le différenciaient, et pendant, l'Holocène, l'altération pédologique de la partie supérieure en lehm achevait de donner au limon de plateau leurs caractères définitifs.

Cette recherche a été conduite dans deux directions complémentaires : d'une part, des corrélations entre les caractéristiques et les propriétés géotechniques et, d'autre part, la modification des caractéristiques du limon par les divers remaniements et altérations.

A/ Corrélation caractéristiques-propriétés géotechniques.

Le traitement mathématique des résultats d'essais effectués sur les divers limons des deux plateaux permet d'énoncer les lois suivantes :

- la plasticité dépend de la teneur en argile. L'indice de plasticité Ip et la limite de liquidité W_1 sont des fonctions linéaires croissantes de la teneur en éléments inférieurs à 2µ .
- les tubulures verticales créent une anisotropie de perméabilité en augmentant la perméabilité verticale (de 4×10^{-9} m/sec à 2×10^{-7} m/sec).
- la résistance à la compression simple dépend (linéairement en première approximation entre 10 et 35% d'argile) de la teneur en eau et de la teneur en argile.
- la compressibilité dépend de la teneur en argile, de la teneur en eau et de la porosité selon la loi suivante :

$$\Delta e = f(e_o) \log \frac{g\,(d2\mu\ ,\ W)}{P}$$

Δe : variation de l'indice des vides

P : pression exercee

e^o : indice des vides initial

$d2_\mu$: teneur en argile

W : teneur en eau

Le tassement sera d'autant plus élevé que la teneur en eau sera forte , la teneur en argile faible et la porosité elevée.

Ces lois appellent trois conclusions :

-bien que souvent invoquée dans le cas du loess, la calcite ne joue aucun role, ni pour la resistance, ni pour la compressibilité.

-l'affaissement à saturation n'est qu'un cas particulier de tassement d'un limon à teneur en eau faible et le critère de Feda ne doit etre appliquée que dans ce cas.

-la sur-consolidion du loess n'éxiste pas.Lalente progression de la saturation au cours des essais en etait seule la cause .

b/ Modification des caractéristiques par remaniement et altération .

n Ce n'est que dans certaines zones du plateau d'Orly ou le ruissellement était faible et l'épaisseur du dépot suffisamment importante, que le loess s'est conservé intact au cours du temps.C'est un materiau homogène, de de granularité bien définie (d_2 = 10%) et de porosité forte(40%).Quand sa teneur en eau est faible, il est à l'affaissement à saturition. Les tubulures verticales rendent sa permeabilité anisotrope et ex-lique la perennité des talus verticaux.

Le remaniement par le gel .

La cryoturbation qui affecta toujours la base des limons sur 1 à 2m d'épaisseur crée un materiau moins poreux et beaucoup plus hétérogène par mélange avec le terrain sous-jacent.Il est donc moins comm

pressible, mais les autres propriétés sont variables d'un point à un autre selon l'apport en éléments argileux et en blocs depuis le substratum.

Le remaniement par le ruissellement.

Selon son intensité, il modifie différemment le loess. Un ruissellement faible décarbonate seulement le loess et la seule propriété modifiée est la perméabilité par la disparition des tubulures. Plus fort, il entraine une diminution de la porosité puis une modification de la granulométrie qui s'éloigne de son caractère éolien. Ce limon devient donc moins compressible, les autres propriétés dépendant de la teneur en argile et de la teneur en eau. Sur le plateau de Roissy, ce type de remaniement a joué un rôle considérable ; il ne subsiste, en effet, que quelques lambeaux de limon carbonaté.

Il est remarquable de constater qu'une de ces conséquences est commune aux divers remaniements . Quel que soit sa cause, en effet, un remaniement naturel entraine la rupture de la structure et la diminution de la porosité. La mesure de la densité pourrait ainsi devenir un critère efficace du remaniement du loess. De plus, l'ingénieur peut conclure qu'un loess remanié sera toujours moins compressible d'un loess intact.

L'altération pédologique.

Elle provoque dans une première phase la décarbonatation, puis l'illuviation crée l'horizon "B" d'accumulation d'argile. Sur le plateau d'Orly, cette évolution de la partie supérieure en lehm est générale. La netteté et l'horizontalité de la limite inférieure de cette couche demeure cependant un problème. A Roissy, le ruissellement intense qui affecte certaines zones n'a pas permis un développement pédologique aussi régulier.

Plus argileux, le lehm est donc plus plastique et devrait être plus résistant et moins compressible. Mais ces deux dernières propriétés sont modifiées par les variations considérables de la teneur en eau dues à la proximité de la surface et par la présence des racines.

Deux idées fondamentales se dégagent donc de cette étude sur les limons de plateaux de la région parisienne :

- Le rôle de la structure est considérable. Toutes caractéristiques égales par ailleurs, l'arrangement des constituants détermine les propriétés de résistance. Cette influence, très apparente dans le cas des limons, ne doit pas lui être spécifique. Elle intervient en proportions variables dans tous les sols et il serait sans doute intéressant de pouvoir la définir plus précisément.

- Les propriétés géotechniques actuelles sont le résultat de toute l'histoire géologique du dépôt. Du point de vue du geotechnicien, l'étude de la genèse doit ainsi conduire à une meilleure compréhension des propriétés. A l'inverse, pour le géologue, il serait surement profitable d'utiliser les résultats de certains essais géotechniques.

VI

ANNEXES

ANNEXE 1.

Situation des échantillons sur le plateau d'Orly.

Tous les échantillons cités dans cette étude concernant Orly sont repérés par un numéro (de 1 à 51). Cette annexe comprend pour chacun d'eux l'indication de la profondeur, de la nature du prélèvement (coupe ou sondage carotté), le répérage sur la carte de situation et les coordonnées Lambert du point du prélèvement.

1/ COUPES.

Nº échantillon	Profondeur en m	Répérage sur la carte de situation	Coordonnées Lambert	
			X	Y
1	0,7	1	600 125	118 700
2	1,0			
3	1,5			
4	1,8			
5 bis	0,40	2	597 200	111 800
5	0,55			
6	0,80			
7	1,30			
8 bis	0,50	3	602 875	117 010
8	0,80			
9	1,00			
10	1,50			
11	1,85			
12	2,5	4	605 200	114 900
13	3,5			
14	4,0			
15	4,5			
16	5,2			
17	0,8	5	601 060	115 000
18	1,0			
19	1,5			

SONDAGES (Suite).

Nº échantillon	Profondeur en m.	Répérage sur la carte de situation	Coordonnées Lambert	
			X	Y
46	3,5	31	602 400	115 950
46 bis	1,4			
47	3,25	32	600 250	117 315
48	0,6	30	602 000	115 410
49	1,4	33	600 500	118 580
50	1,2	34	603 000	116 550
51	1,0	35	602 350	114 450

ANNEXE 2.

Situation des échantillons sur le plateau de Roissy.

1) De même que pour le plateau d'Orly, les échantillons cités dans cette étude sont répérés par un numéro (de 1 à 71 pour le plateau proprement dit, 1 à 15 pour le thalweg de Mitry-Mory). Cette annexe comprend, pour chacun d'eux, l'indication de la profondeur, de la nature du prélèvement (coupe ou sondage carotté), le répérage sur la carte de situation et les coordonnées Lambert du point de prélèvement.

2) Zone à limon carbonaté.

1/ COUPES

Nº échantillon	Profondeur en m.	Répérage sur la carte de situation	Coordonnées Lambert.	
			X	Y
1	0,5	1 (coupe 1)	615 075	145 196
2	1,0			
3	1,5			
4	2,0			
5	2,5			
6	3,5			
7	0,7	2 (coupe 2)	615 008	145 962
8	1,0			
9	1,5			
10	2,0			
11	2,7			
12	3,5			

2/ SONDAGES.

Nº échantillon	Profondeur en m.	Répérage sur la carte de situation	Coordonnées Lambert	
			X	Y
13	2,0	3	613 883	145 782
14	3,0			
15	1,8	4	613 888	145 677
16	3,0	5	614 300	147 900
17	2,0	6	614 350	144 812
18	2,0	7	617 300	144 430
19	2,0	8	618 470	144 800
20	2,5	9	620 850	143 200
21	3,0	10		
22	2,0	11	616 950	146 170

2) Zone à limon carbonaté.

1/ COUPES (Cf § III,B,1º)

Nº échantillon	Profondeur en m.	Répérage sur la carte de situation	Coordonnées Lambert	
			X	Y
23	1,8	12 (coupe 3)	614 200	145 000
24	2,2			
25	3,0			
26	3,4			
27	3,9			
28	1,1	13 (coupe 4)	614 200	145 200
29	1,8			
30	2,5			
31	3,0			

2/ SONDAGES.

Nº échantillon	Profondeur en m.	Répérage surla carte de situation	Coordonnées Lambert	
			X	Y
32	2,1	14	615 770	146 450
33	3,0			
34	1,7	15	614 400	145 980
35	0,5	16	615 520	146 880
36	2,5			
37	4,5			
38	2,0	17	615 800	146 950
39	2,0	18	617 150	144 420
40	2,0	19	617 450	144 440
41	2,0	20	618 150	144 570
42	2,0	21	616 950	146 170
43	2,0	22	614 250	146 290
44	3,0			
45	2,0	23	614 270	146 460
46	3,0			
47	4,0			
48	2,0	24	615 000	144 850
49	2,0	25		
50	4,2	26	614 420	146 550
51	5,5			
52	2,5	27	614 030	146 170
53	3,5			
54	2,8	28	614 100	146 140
55	1,0	29	615 800	146 950
56	1,0	30	616 200	147 000
57	1,0	31	614 900	146 800
58	1,0	32	616 650	147 050
59	1,0	33	616 950	146 170

SONDAGES (Suite)

Nº échantillon	Profondeur en m.	Répérage sur la carte de situation	Coordonnées Lambert	
			X	Y
60	3,4	34	614 700	147 740
61	1,6	35	614 670	147 440
62	1,5	36	616 440	144 950
63	1,0	37	617 480	145 600
64	1,0	38	616 950	144 200
65	1 0	39	615 960	146 060
66	1,0	40	620 550	143 540
67	1,0	41	614 270	146 460
68	1,0	42	614 350	144 800
69	1,0	43	615 000	144 850
70	1,0	44	614 950	145 190
71	1,7	45	614 400	145 980

3) Thalweg de Mitry-Mory.

Nº échantillon	Profondeur en m.	Répérage sur la carte de situation.	Coordonnées Lambert	
			X	Y
1	5,0	46	620 340	143 560
2	3,3	47	620 375	143 490
3	0,8	48	620 375	144 340
4	1,1	49	620 450	144 240
5	2,3	50	620 430	144 110
6	1,2	51	620 450	143 950
7	2,8	52	620 375	143 490
8	1,0	53	620 440	143 820
9	1,2	54	620 430	143 600
10	1,25	55	620 410	143 580
11	2,8	56	620 376	144 340
12	4,0	57	620 310	143 590
13	3,6	58	620 370	143 550
14	1,8	59	620 350	143 550
15	2,5	60	620 390	143 550

ANNEXE 3 : Rappel sur les essais géotechniques.

Cette annexe sur les essais géotechniques est un bref rappel de leur principe, de leur utilité et surtout de leur signification.

1/ LA PLASTICITE.

En faisant varier la teneur en eau d'un sol, on peut amener un échantillon de sol à trois états différents : liquide, plastique et solide. Ce sont les limites entre ces différents états estimés à l'aide d'un essai normalisé sur la fraction inférieure à 50µ du sol que l'on appelle les limites d'Atterberg ; elles s'expriment en teneur en eau. W_l est la limite de liquidité, W_p celle de plasticité, la différence entre les deux étant l'indice de plasticité I_p. Il donne une mesure de l'étendue de la zone pour laquelle le matériau est susceptible de grandes déformations. Cet essai est surtout utilisé pour estimer les possibilités de terrassement.

2/ LA RESISTANCE DU SOL.

La rupture dans un sol se manifeste par un dépassement des contraintes tangentielles. Si l'on considère un élément unitaire de surface de glissement, sur lequel agit une contrainte normale, σ , il faut pour provoquer le glissement, une contrainte tangentielle τ telle que :

$$\tau = C + \sigma \ tg \ \phi$$

C est la cohésion
ϕ est l'angle de frottement.

On peut mesurer ces deux grandeurs par plusieurs essais où l'on soumet un échantillon à une pression verticale allant jusqu'à la rupture. Deux sont évoquées dans cette étude : le triaxial et l'essai de résistance à la compression simple.

a) le triaxial.

C'est le plus précis des essais car il permet d'effectuer des compressions à drainage variable et en contrôlant la pression latérale. Les essais non consolidés rapides (NCR), les seuls dont il est fait mention dans cette étude, sont les plus courants. On en déduit la cohésion apparente Ca et l'angle de frottement ϕ a qui sont, caractéristiques de la résistance à court terme. En mesurant la pression intersticielle, on peut également en déduire C' et ϕ ', cohésion et angle de frottement.. intergranulaires caractéristiques de la résistance à long terme.

b) Résistance à la compression simple.

La compression verticale a lieu sans aucune pression latérale. On ne peut en déduire l'un des paramètres (cohésion ou angle de frottement) que si l'autre est connu.

3/ LA COMPRESSIBILITE.

On mesure la compressibilité d'un sol quand ses déformations latérales sont empêchées, c'est l'essai à l'oedomètre. Il est fait, en principe, avec un échantillon saturé. On porte alors sur graphique la variation de l'indice des vides en fonction de la pression exercée. (coube oedométrique). Cette "courbe" oedométrique est, en général, constituée de deux branches : une partie horizontale (faible variation de l'indice des vides) jusqu'à une pression Pc, puis une variation plus forte. La pente de cette seconde droite est l'indice de compressibilité Cc. Cet essai est utilisé pour la prévision des tassements.

4/ LE COMPACTAGE.

Pour augmenter la résistance et diminuer la perméabilité

il est souvent nécessaire dans les chantiers routiers, de compacter le sol. L'essai normalisé dans ce domaine est l'essai Proctor. On mesure la densité obtenue pour une énergie de compactage donnée qui est imposée par les normes à respecter pour la voie de circulation. On utilise en fait, deux niveaux d'énergie qui définissent l'essai Proctor Normal (PN) et l'essai Proctor Modifié (PM). La densité varie en fonction de la teneur en eau de compactage et passe par un maximum. Les coordonnées de ce point sont appelées la densité optimale, (γ d.opt) et la teneur en eau optimale (W % opt). La résistance du matériau compacté ou en place est mesurée par l'essai CBR (Californian Bearing Ratio) ou l'essai de Westergaard. Dans l'un comme dans l'autre, on mesure l'enfoncement d'une plaque dans le sol.

L'indice portant californien (CBR) est le rapport en pourcentage, entre les pressions produisant un enfoncement donné dans le matériau étudié, d'une part, et dans un matériau-type, d'autre part. L'essai est effectué avec un appareillage normalisé et dans des conditions bien déterminées.

Le module de Westergaard (K) est égal, par définition, à :

$$K = \frac{0,7}{e}$$

e étant l'enfoncement d'une plaque de dimensions normalisées soumise à une pression donnée.

VII

BIBLIOGRAPHIE.

VII. BIBLIOGRAPHIE.

Abreviations :

AF.E.Q.	:	Association Française d'Etude du Quaternaire.
A.G.B.P.	:	Association des Géologues du Bassin de Paris.
Am. J. of Sc.	:	American Journal of Science
Anthrop.	:	Anthropologie
B.S.G.A.L.	:	Bulletin du Service Géologique d'Alsace et de Lorraine.
B.S. .F.	:	Bulletin de la Société Géologique de France.
B.S.P.F.	:	Bulletin de la Société Paléontologique de France.
C.R. Acad.Sc.	:	Compte rendu de l'Académie des Sciences.
C.R.S.G.F.	:	Compte rendu de la Société Géologique de France.
R.G.P.G.D.	:	Revue de Géographie Physique et de Géologie Géologique.

AGAFONOFF V. (1924)
Sur quelques propriétés des loess.
C.R. Acad. Sc. T 178, p 103-105

AGAFONOFF V. et MALYCHEFF V. (1929)
Sur le loess et autres limons du plateau de Villejuif.
B.S.G.F. (4) 29, p 109-145 - 1 carte pl. XI-XIV

ALEMEN H. (1954)
Colorimétrie des sédiments quaternaires et paléoclimats. Premiers résultats.
B.S.G.F. (6) T. 4, p 609-619, 3 fig.

ARNOULD M. (1968)
Origine, formation et distribution des sols en France et en Europe Occidentale.
Fondations, p 1-43, Dunod, Paris

AVENARD J.M. (1960)
La solifluxion
164 p. Ed. CDU, Paris

BASTIN B. (1969)
Premiers résultats de l'analyse pollinique des loess en Belgique.
Bull. A.E.F.Q. nº 18, p 3-12, 3 fig.

BASTIN B. et COUTEAUX M. (1966)
Application de la méthode de Frenzel à l'extraction des pollens dans les sédiments, archéologiques pauvres.
Anthrop. 70(-1-2) p. 201-203

BEAVERS AH, JOHN W.D., GRIM R.E. and ODEL R.T. (1955)
Clays minerals in some Illinois soils developped from loess and till under grass vegetation.
Clays and clays minerals (3rd Nat. Conf. 1954) p. 356-372

BERNARD J. (1963)
Première contribution à l'étude cartographique du loess dans le nord-ouest de la région parisienne.
DES. Ronéot. p. 1-25, Paris

BERTRAND M. (1968)
Compte-rendu de l'excursion du 18 aout à Bicêtre et à Villejuif.
B.S.G.F. T. XVII, p. 845-850.

BETIEMIEUX R. -(1954)
Influence du plan d'eau sur la précipitation d'éléments minéraux dans le sol.
C.R. Acad. Sc. T. 241, Vol. 9, p 816-818

BLACK P. (1950)
Applied sedimentation.
Ed. P.D. Trask p. 247-275

BLACKEMORE L.C. and SWINDALE L.D. (1965)
Chemistry and clay mineralogy of a soil sample from Antartica.
Nature, Vol. 182, Nº 4627, p. 47-48

BOLLEN R.E. (1945)
Characteristics and uses of loess in highway construction.
Am.J.of Sc. Vol 243, p 283-293

BONIFAY E. (1952)
Les limons loessiques de la région de Marseille.
B.S.G.F. (2) p. 461-466

BORDES F. (1946)
La stratigraphie des limons de la carrière Bouchon, à Ivry, et de ses répercussions possibles sur la chronologie préhistorique.
B.S.G.F. (5) T. 16, p 503-510 1 fig.

BORDES F. (1949)
Loess et cailloutis : le complexe loessique, phéhomène cyclique.
C.R. Congrès Sédimentation et Quaternaire, p. 173-181

BORDES F. (1950)
Sur les phénomènes de cryoturbation observés dans le loess du Bassin Parisien.
C.R.S.G.F. Nº 3 p. 35-37

BORDES F. (1952)
Stratigraphie du loess de l'ouest du bassin parisien.
Anthrop. T 56 nº 1 et 2

BORDES F. (1957)
Radiocarbone et corrélation loessique.
Anthrop. Paris, T 61, p. 572-573

BORDES F. (1969)
Le loess en France.
Bull. A.F.E.Q. Supplément VIIIe Congrès Int. I.N.Q.U.A. p. 69

BORDES F. et FITTE P. (1949)
Les limons de la région de Villejuif et leurs industries paléolitiques.
Anthrop. T 56, Nº 1-2, p. 1 à 18, fig. 1-9 et 5-6 p. 407-433 fig 1-28

BOURDIER F. (1967)
Aperçu sur la stratigraphie des limons quaternaires du bassin de Paris.
Bull. A.G.B.P. N° 13 p. 185-186, 1 fig.

BRAJNIKOV B. (1941)
Remarques sur une caractéristique des limons.
C.R.Acad. Sc. T 212, p 800-803

BRAJNIKOV B. (1942)
Remarques sur les constituants des formations superficielles.
C.R.Acad.Sc. T 214, p 374-377

BRAJNIKOV B. (1942)
Quelques considérations sur l'évolution des limons.
B.S.G.F. (5) T XII, p 91-95

BRAJNIKOV B. (1942)
Quelques remarques sur la matière organique, le fer et le calcium dans les limons.
C.R.S.G.F. p 44-55

BRAJNIKOV B. (1944)
Sur l'origine des grains de quartz dans les sables et les limons.
C.R.S.G.F. p 36-38

BRAY R.H. (1934)
Chemical study of soil development in Peorion loess region of Illinois.
Am. Soil Surv. Ass. Bull. Nº 15 p. 58-65

BRUNTON G. (1955)
Vapour pressure glycolation of oriented clay minerals.
Am. Mineralogist 10, p 124-126

CAILLERE S. et MALYCHEFF V. (1957)
Etude de la fraction argileuse du loess du Bassin parisien
C.R.Acad.Sc. T. 125, p 1446-1448

CAILLEUX A. (1937)
Action éolienne périglaciaire en France.
C.R.S.G.F. Nº 12 p. 127

CAILLEUX A. (1938)
Cailloux éoliens et solifluxion en Franve et en Europe septentrionale.
B.S.G.F. (5) T. VIII, p. 719-729, 1 fig, 1 pl.

CAILLEUX A. (1953)
Le loess et les limons éoliens de France.
Bull. Serv. Cart. Géog. Fr. Nº 240 T II, p 437-459

CAILLEUX A. (1962)
Mar es, mar alles et pingos.
C.R. Acad. Sc. T 242, p 1912-1914

CAILLEUX A. (1954)
Genèse possible de dépôts chimiques par congélation.
C.R.S.G.F. Fasc. 1, p 11-12

CAMEZ TH (1957)
Evolution des minéraux argileux dans les lehms des environs de Strasbourg.
B.S.G.A.L. 10, p 21-25

CAMEZ TH (1962)
Etude sur l'évolution des minéraux argileux dans le sol des régions tempérées.
Mem. Serv. Cart. Geol. Als. et Lorraine nº 20, p 90

CAMEZ T., FRANC DE FERRIERES P.J., LUCAS J. et MILLOT G. (1960).
Sur l'importance de la vermicul ite dans certains sols tempérés et dans les dépôts du quaternaire ancien.
C.R.Acad.Sc. T. 250, p 3038-3040

CAQUOT A. et KERISEL J. (1966)
Traité de mécaniques des sols.
506 p. Ed. Gauthier-Villars, Paris

CAVELIER C.P. et DAMIANI L. (1969)
Les limons du bassin Parisien dans l'industrie des tuiles et briques.
Mem. hors série Soc. Géol. de Fr. Nº 5, p 117-121, 2 fig.

CAYEUX L. (1922)
Origine éolienne de l'ergeron des environs de Paris.
C.R. XIIIe Congrès Géol. Int. T. 3, p 1231-1234

CHARLESWORTH Jr. (1957)
The quaternary area.
Vol. 2, Ed. Arnold, 1700 p. 326 fig.

DANIEL R. (1965)
Représentation du silex moustérien de Villejuif
B.S.P.F. T. 62, Nº 1, p 63-69 3 fig.

DANIEL R. et VINOT A. (1963)
Moustérien du limon loessique de l'Hay -les-Roses (92)
B.S.P.F. T. 60 nº 5-6, p 291-298 3 fig.

HILL D.E. a,d TEDROW J.C.F. (1961)
Weathering and soil formation in the artic environnement.
Amer. J. of Sc. Vol 259, p 84-101

DELANOUE J. (1867)
De l'existence de deux loess distincts dans le nord de,la France
B.S.G.F. (2) T. 24, p 160-166

DELIBRIAS G. et LAMOUREUX C. (1966)
Datation absolue des dépôts organiques würmens en Normandie.
C.R.Acad.Sc. T. 263, p. 1022-1024

DEWOLF Y. (1969)
Compte rendu de la commission de cartographie des limons.
Mem. Hors série. SOc. Géol. de Fr. Nº 5 p. 139-141

DOUVILLE (1910)
Sur la formation du limon des plateaux.
C.R. Acad. Sc. T. CLI, p. 630-634

DREW Jr. and TEDROW J.C.F. (1957)
Pedology of an artic brown soil near Point Barrow, Alaska.
Soil Sc. Soc. Am. Proceed, Vol. 21, p 336-339

DREW Jr, TEDROW J.C.F., SHANKS R.E. and KORANDA J.J. (1958)
Rate and depth of thaw in an artic soil.
Trans. Am. Geophys. Union Vol. 39, nº 4 p. 497

DUBOIS G. (1931)
Les principaux types de limons en France septentrionale.
Revue Scientifique 11/07/1931 p. 1-9

DUBOIS G. et FIRTION F. (1936)
Esquisse de l'extension des limons loessiques en France.
B.S.G.A.L. Cart. T. III, p 21-26,1 carte.

DUCHAUFOUR PH. (1960)
Précis de Pédologie
Masson

DUDAL R. (1952)
De la genèse des sols sur limon loessique.
Pédologie Nº 2, p 22-26, 2 fig.

DUPLAIX et MALTERRE F. (1946)
Les associations de minéraux lourds dans les limons quaternaires du Bassin Parisien.
B.S.G.F. (5) T. 16, p 173-176

EDELMANN CH (1946)
Les limons et sables de couverture des Pays-Bas.
Geol. des terrains récents de l'ouest et de l'Europe, Sess.
Ext. Soc. Belge de Géol.

EDELMANN C. (1946)
Quelques résultats des travaux de la carte pédologique des Pays-Bas.
Bull. Soc. Belge de Géol. p 57

EDELMANN C. et TAVERNIER R. (1949)
La signification économique de la géologie du quaternaire.
C.R. Congrès Sed. et Quat. p. 229-235

EK C. et PISSART A. (1964)
Dépôt de carbonate de calcium par congélation et teneur en carbonate de chaux des eaux résiduelles.
C.R.Acd.Sc. T. 260, p 929-932

ELIAS M.K. (1945)
Loess and its economic importance.
Am. J. of Sc. p 227-230

FAURE H. et DELIBRIAS G. (1967)
Recommandations pour le prélèvement d'échantillons à dater par le radiocarbone C14.
Bull. Ass. Sénégalaise et Quart. de l'Ouest Africain,Nº 12

FEDOROFF N. (1965)
Les paléosols quaternaires des climats tempérés.
R.G.P.G.D. (2) Vol VII, 1 fig. p 79-88

FEDOROFF N. (1966)
Les cryosols
Sc. Sol. T 2 p. 77-110, 3 fig.

FEDOROFF N. (1969)
Les pédogènes quaternaires en France
Publ. Labor. Géol. ENSA, Grignon, p 1-20

FEDA J. (1966)
Structural stability of subsident loess soil from Praha-Dejvice.
Eng. Geol. Nº 3, March 1966

FLORSCHUETZ F. (1946)
Tentative pour dater le loess de Gueldre.
Geol. des terrains récents de l'ouest de l'Europe. Sess. Ext.
Soc. Belge de Géol.

FOOKES P.G. and BEST R. (1969)
Consolidation characteristics of some late pleistocene periglacial metastable soils of East Kent.
Quart. J. of Eng. Géol. Vol. 2, nº 2

FOOKES P.G. and KNILL J.L. (1969)
Engineering geology in regional developments
Eng. Geol. 1969 (3) p 81-120

GLENN R.C., JACKSON M.L., HOLE F.D. and LEE G.B. (1960)
Chemical weathering of layer silicate clays in loess derived Tama silt loam of Southern Wisconsin.
Clays and clays minerals, VIIIe Nat. Conf. 1959, p 63-83

GOGUEL J. (1945)
Une observation sur la congélation d'un banc marneux.
C.R.S.G.F. p 45-46

GULLENTOPS F. (1958)
Méthode d'étude pétrographique des dépôts loessiques.
INQUA IV, Congrès Rome, Pise actes, p 286-290

HOBBS W.H. (1931)
Loess pebbles bands and boulders from glacial outwash plains of the Greenland continental glacier.
Journal Of Géol. 39, 4, p 381-385

HOBBS W.H. (1933)
The origin of loess associated with continental glaciation based upon studies in Greenland.
Int. Geol. Congress, Paris 1931

HOLTZ WG, and GIBBS HJ (1951)
Consolidation and related properties of loess.
Am. Soc. Test. Mat. Spec. Tech. Public. nº 126

HOWORTH H. (1882)
The loess
Geol. Mag. T, 19, p. 343

JACKSON M.L. (1959)
Frequency distribution of clays minerals in major great soil as related to the factors of soil formations.
Clays and clays minerals, VIe Nat. Conf. p 133-143

JAHN A. (1969)
Structures périglaciaires dans le loess de Pologne.
Vol. résumé commun VIIIe Congrès INQUA, p. 212

JAMAGNE M. (1964)
Introduction à une étude pédologique dans la partie nord du bassin parisien.
Pédologie T. XIV, fid. 2, p 228-342, 16 phot., 15 fig. 4 tab. Gand.

JAMAGNE M. (1969)
Données sur l'évolution pédogénétique des formations limoneuses en Europe Occidentale.
Mem. hors série, Soc. Géol. de Gr. Nº 5 p 37-52, 2 fig.

JAMAGNE M. et FEDOROFF N. (1969)
Comparaisons micromorphologiques de quelques sols sur limons du bassin parisien.
Mem. hors série,Soc.Géol. de Fr. Nº 5 p 73-79, 12 clichés

KANE H. (1969)
Consolidation of two loessial soils"
Highway Research Board, Record Nº 284, p 26-36

KRAYEV V.F. (1969)
On subsidence of loess soils of Ukraine.
Actes du colloque de Tokyo (sept. 1969) Vol. 1, p 321-322, IASH/AIHS UNESCO

KRINITTZSKY E.L. and TURNBULL W.J. (1966)
Loess deposits of Mississipi.
Spec. Pap. Geol. Soc. ... º 4 p. 1 64

KRYNINE E.D. and JUDD W. (1957)
Principles of engineering geology and geotechnics.
New York, Mc Graw Hill, 1957, 730 p

LADRIERE J. (1890)
Etude stratigraphique du terrain quaternaire du nord de la France.
Ann. Soc. Geol. Nord, T 18, p 93-149 et 205-276, 20 fig., 2 pl.

de LAPPARENT A. (1885)
Note sur le limon de plateau dans le bassin parisien.
B.S.G.F.(3) T. XIII, p 456-461

LAUTRIDOU J.P. (1967)
Le loess du pays de Caux : origine et signification paléoclimatique.
C.R.S.G.F. nº 6 p 248-249

LAUTRIDOU J.P. (1969)
Les loess du pays de Caux
Mem. hors série, Soc. Geol. de Fr. Nº 5, p 81-105, 16 fig.

LAUTRIDOU J.P. (1969)
Compte rendu de la commission de terminologie des limons.
Mem. hors série, Soc. Geol. de Fr. Nº 5, p 123-127

LAVILLE A. (1897)
Sur les silex taillés recueillis dans les limons quaternaires de Villejuif
B.S.G.F. (3) T. 25 p. 196-197

LAVILLE A. (1904)
Etude des limons quaternaires de Villejuif.
Campagne de 1903-1904, FGN (4) p 79-80, 2 fig.

LEMOINE P. (1918)
Géologie du Bassin Parisien.
408 p. 136 fig. 9 cartes

LEONARDS G. (1968)
Les fondations.
Dunod, p 16-22 et 397-402

LEROI-GOURHAN A. (1968)
Dénomination des oscillations würmiennes"
Bull. A.F.E.Q. Fasc. 4, p 281-287

LETOLLE R. (1968)
Datation par la méthode potassium-argon des terrains pliocènes quaternaires.
R.G.P.G.D. (2) T.X. fasc. 1, p 65-76

LISZKOWSKY J. (1971)
Filtrational deformations of loess deposits.
Biuletyn geologiczny, T XIII, p 128-132, Wydawnictwa Uniwersyteta Warszawskiego (résumé en anglais).

MALTERRE H. (1946)
Variabilité affectant la constitution des limons quaternaires du bassin parisien.
C.R.Acad. Sc. T 222, p. 1006-1007

MALTERRE H. (1946)
Contribution à l'étude des limons quaternaires du bassin parisien.
Thèse Sc. N°2134, 108 p., 12 fig.

MALYCHEFF V. (1929)
Le loess.
R.G.P.G.D. T. 2, p 147-182, 4 pl., 1 fig.

MALYCHEFF V. (1933)
Le loess
R.G.P.G.D. (2), T. 6 p 131-164

MALYCHEFF V. (1937)
Recherche sur les minéraux argileux de quelques loess.
70e Congrès Soc. Savantes, T LX, p 293

MANIL G. (1952)
Quelques considérations générales sur la stratigraphie quaternaire et la pédogenèse à propos de la description de trois coupes de loess.
Ann. Soc. Géol. Belg. T LXXV, p 153-167

MAZENOT G. et CAILLEUX A. (1957)
Cryoturbation et loess würmien de l'aérogare d'Orly.
B.S.G.F. (6) T VIII, p 853-860, 1 fig.

MAZENOT G. (1963)
Etude malacologique des loess d'Alsace.
Bull. Serv. Cart. Geol. Als. et Lorr. T 16, fasc. 1

de MERCEY N. (1865)
Notes sur les éléments du terrain quaternaire au x environs de Paris et dans le bassin de la Somme.
B.S.G.F. (2) T. XXII, p 69-104, 14 fig.

de MERCEY N. (1884)
Sur la distinction des divers dépôts du quaternaire ancien dans le nord de la France.
B.S.G.F. (3) T XIII, p 573-575.

MICHEL J.P. (1955)
Microtectonique périglaciaire quaternaire dans les formations sédimentaires du bassin parisien.
Cah. Géol. Nº 77-78 p 893-896

MICHEL J.P. (1966)
Description des phénomènes périglaciaires dans les sables oligocènes (Stampien) de la butte rémoin de Champlan (S. et O.) au sud de Paris.
Bull. ANVL, T. XIII, nº 5-6 p 55-59, 8 fig.

MICHEL J.P. (1967)
Historique des recherches sédimentologiques sur les loess de la région parisienne.
Bull. Inf. Géol. Bas; Paris, nº 13, p 215-219

MICHEL J.P. (1967)
Compte rendu du colloque des limons.
Bull. A.G.B.P. nº 13 p 175-179 , 1 fig.

MICHEL J.P. (1969)
Historique et évolution des recherches sur les loess de la région parisienne.
Mem. hors série, Soc. Géol. de Fr. Nº 5 p 33-36

MICHEL J.P. (1972)
Le Quaternaire du Bassin Parisien.
Thèse d'Etat, Univ. Paris VII

MILLOT G. (1949)
Relations entre la constitution et la genèse des roches sédimentaires argileuses.
Geol. Appl. et Prosp. Min. T II, nº 2,3,4

MILLOT G. CAMEZ M. et WERNERT P. (1957)
Evolution des minéraux argileux dans les loess et les lehms d'Aschenheim.
Bull. Serv. Cart. Geol. Als. et Lorr. T. 10, fasc. 2

MONTURIOL R. et GALLARDO D. (1969)
Les paléosols dans les formations quaternaires.
Vol. Résumé Commun VIIIe congrès INQUA p 98

MOTAMED A. (1962)
Contribution à l'étude sédimentologique et à l'étude de l'origine du loess du sud-ouest de la région parisienne.
Thèse Univers. Ronéot. p 1-90, 41 tabl.

NICOLESCO C.P. (1938)
Limons des plateaux du Bassin de Paris, mode de formation, origine.
C.R.S.G.F. (5) T VIII, p 310

PISSARD A. (1970)
Les phénomènes physiques essentiels liés au gel, les structures périglaciaires qui en résultent et leur signification climatique.
Ann. Soc. Géol. Belg. T 93, p 7-49

POMEROL Ch. (1967)
Esquisse paléogéographique du bassin de Paris à l'ère tertiaire et au temps quaternaire.
R.G.P.G.D. Vol IX, fasc. I p 55-85, 17 fig.

POMEROL CH. (1968)
Intérêt et applications de l'étude des minéraux lourds.
R.G.P.G.D. (2) Vol X, fasc. 4, p 383-396

QUIGLEY R. and DREIMANIS A. (1966)
Secondary aragonite in soil profil.
Earth and Planetary science letters p 348-350, 1 fig. Amsterdam.

REUTER F. (1969)
Ein Beitrag zur Ingenieur Geologie des Löss am Beispiel einen
Bauschadenfallen in der Mansfelder Mulde.
Berg Akademie, 21 Zg, Helst. 7 juli

de RICHTHOFEN F. (1882)
On the mode of origin of the loess
Geol. Mag. T 19, p 293

RIVIERE A. (1952)
Sur la représentation graphique des sédiments meubles.
B.S.G.F. (2) T , p 145-167

RUDOLPH V., MATALUCCI, SHELTON J.W. and ABDEL-HADY M. (1969)
Grain orientation in Vicksburg loess"
Journ. Sed. Petrol. Vol. 39, p 969-979

SMALLEY I.J. (1966)
The properties of glacial loess and the formation of loess deposits.
Journ. Sed. Petro. Vol 36, p 669-676

SOUCHEZ R. (1966)
Reflexions surl'évolution des versants sous les climats froids.
R.G.P.G.D. (2) Vol. VIII, fasc. 4 p 317-334

SOYER R. (1950)
Minéralogie et pétrographie de la égion parisienne.
Mem. Muséum Hist. Nat. T 1, fasc 3, érie ;Sc. de la terre.

SOYER R. (1953)
Géologie de Paris.
Mem. Cart. Géol. détaillée de la Fr. 610 p, 46 fig. 6 pl. h.t.

SOYER R. et CAILLEUX A. (1960)
Géologie de la région parisienne.
Que sais-je ?, 126 p. PUF, Paris

SWINEFORD A. (1950)
Petrographic comparaison of some loess samples from western Europ with Kansas loess.
Jour. Sed. Petro. Vol 25, Nº 1

TAMAIN G. (1962)
Contribution à l'étude du quaternaire des "Hautes Bruyères" à Villejuif.
B.S.G.F. T 59, Nº 3-4, p 268-277, 5 fig.

TEDROW J.C.F. -(1955)
Arctic brown soil.
Soil Sc. Vol, 9, p 39-45

TEDROW J.C.F. (1958)
Major genetics soils of the Arctic slope of Alaska.
Jour. of soil Sc. Vol 9, p 33-45

TERZAGHI K. (1950)
Mecanism of landslide.
In Berkey, Vol 83-123, New York Geol. Soc. Am.

TERZAGHI K. (1955)
Influence of geological factors on the engineering properties of sediments.
Economic Geology, 30 th anniversary Vol., part.II

THORP J. (1945)
Significance of loess in classification of soils.
Am. J. of Sc. nº 243, p. 263-269

TOKARSKI J. (1961)
Le "roche loessique" : un document capital de l'époque glaciaire.
INQUA VIe Congrès Poland Abst. of papers supplément, p 51-55

TRICART J. (1956)
Carte des phénomènes périglaciaires : le quaternaire en France.
Mem. Cart. Géol. détaillée de la Fr. 94 p., Paris.

TRICART J. (1965)
Principes et méthodes de géomorphologie.
96 p. 36 fig. Masson, Paris

TRICART J. et CAILLEUX A. (1967)
Le modelé des régions périglaciaires.
T II, 508 p. Sedes, Paris

TURNBULL W.J. (1948)
Utility of loess as a construction material.
Proc. 2nd Int. Conf. Soil Mechan. and Found Engng., vol. 5 p 97-103

VINCENT P.L. et VOGT J. (1969)
Principe de la cartographie des formations superficielles.
INQUA VIIIe Congrès Paris

WATKINS W.I. (1945)
Observations on the properties of loess ngineering structures.
Am. J. of Sc. Vol. 243, p. 295-303

WHITE W.A. (1949)
Atterberg plastic limits of clay minerals.
Am. Mineralogist. Vol. 34, p 508-512

VIII

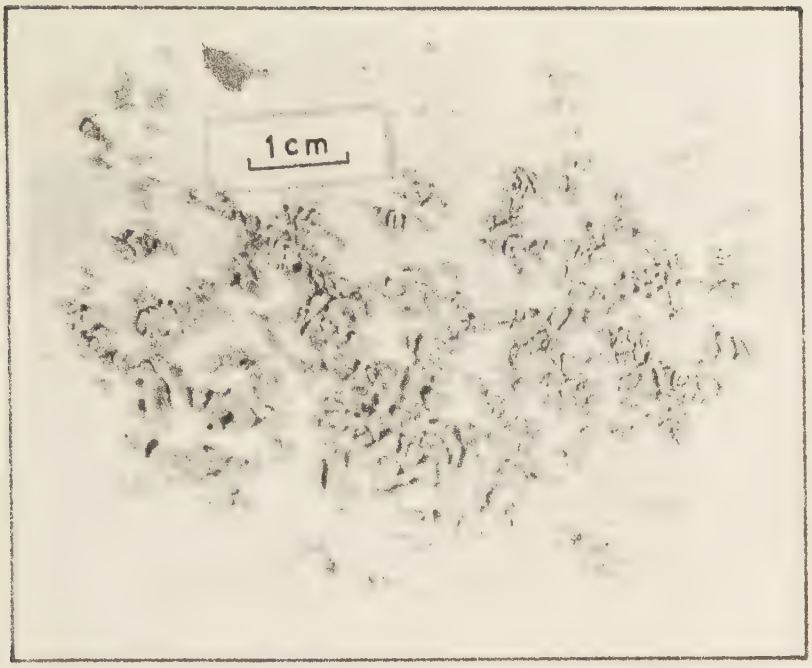
PHOTOS ET TABLEAUX

A. PHOTOS

LOESS_ORLY : Concrétions de calcite

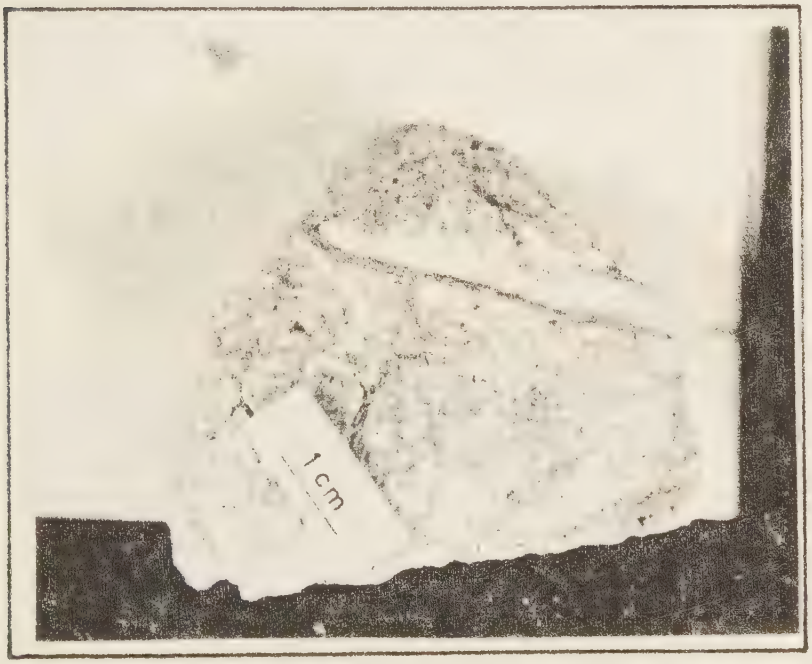
Divers types de tubulures

(cf § II,C)



Type I : concrétions résistantes
(photo 1)

Photo 1



Type II : concrétions friables
(photos 2 et 3)
On remarquera sur la photo 2
les débris végétaux occupant
le centre des concrétions

Photo 2

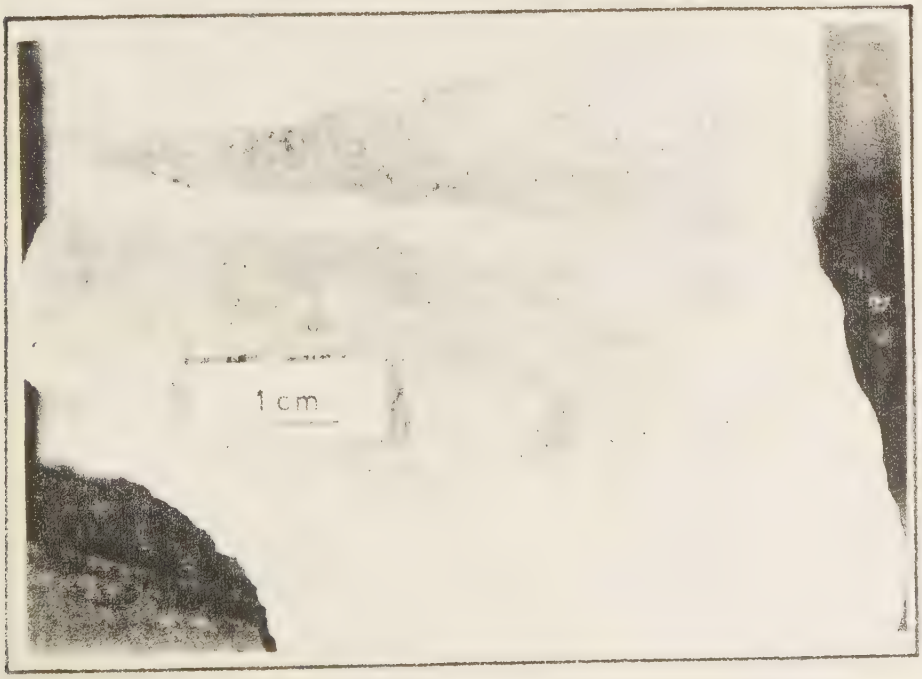
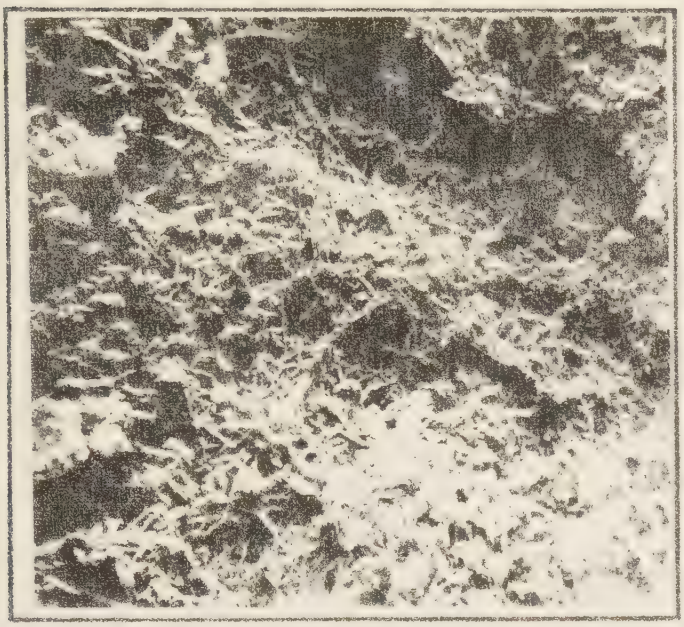


Photo 3

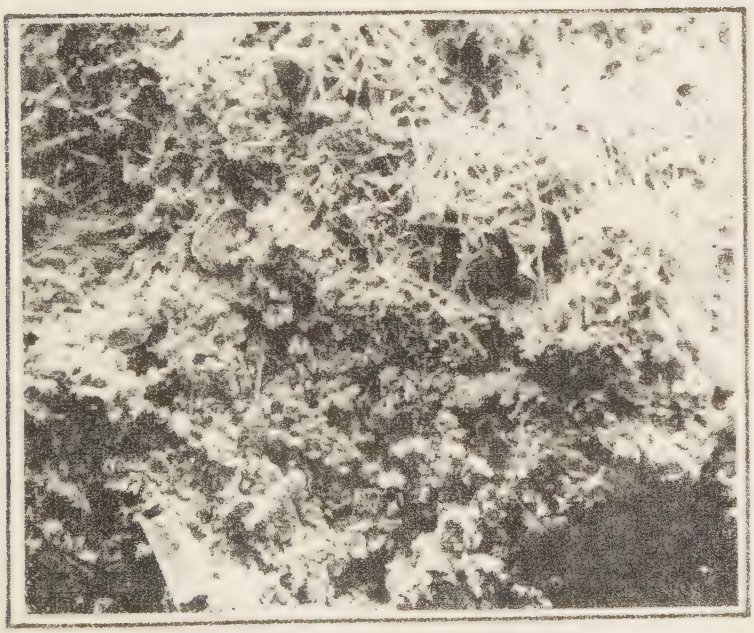
LOESS _ORLY : Concrétions de calcite



75 µ

Amas de fibres de calcite

Photo 4

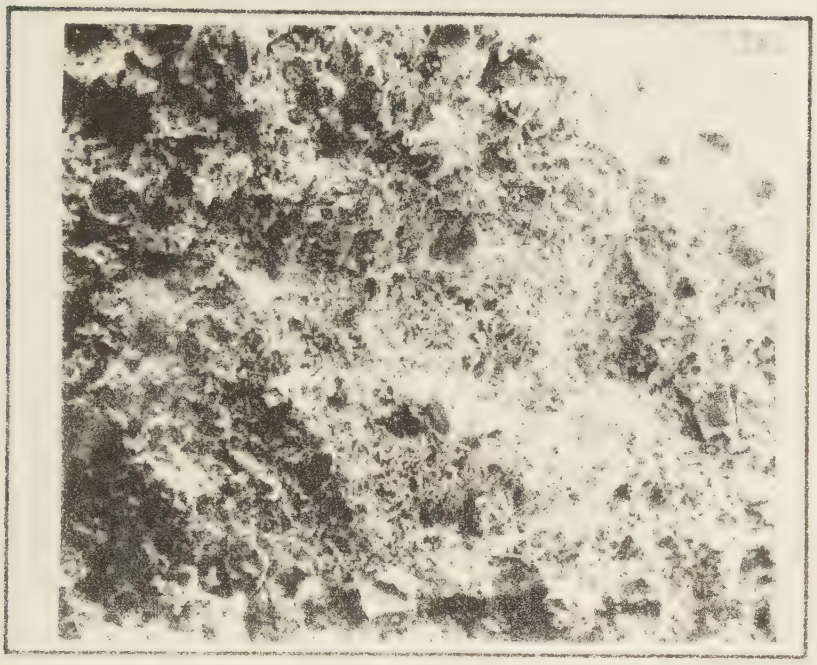


75 µ

Limite d'un amas de fibres

Photo 5

LOESS _ ORLY : Concrétions de calcite



75 µ

Amas de fibres en
"remplissage" de cavités

Photo 6

——— Limite de l'amas

- - - - Limite des deux tubulures

L'axe des tubulures est perpendiculaire
à la surface de l'échantillon
Les fibres semblent radiales.

LOESS _ ORLY : Concrétions de calcite

Divers types de fibres

10 µ

Photo 7

Type A

Fibres longues, fines, souples

On remarquera les débris végétaux associés

10 µ

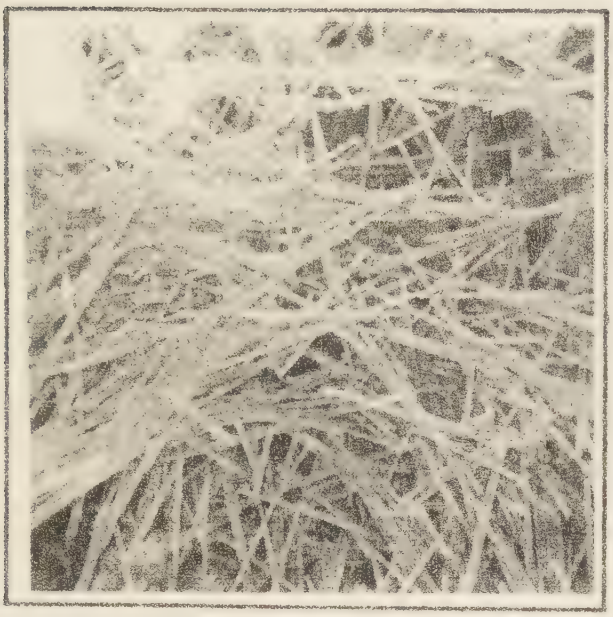
Photo 8

Type B

Fibres courtes et rigides.

LOESS _ ORLY : Concrétions de calcite

Fibres de type B



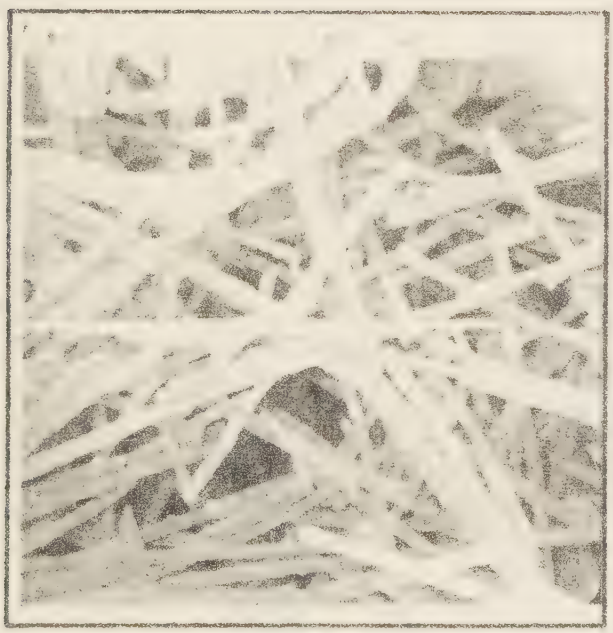
10 µ

Photo 9

La surface des fibres est cannelée

La section semble rectangulaire

[les ondulations de la partie supérieure de la photo 10 sont dues à un défaut de balayage]

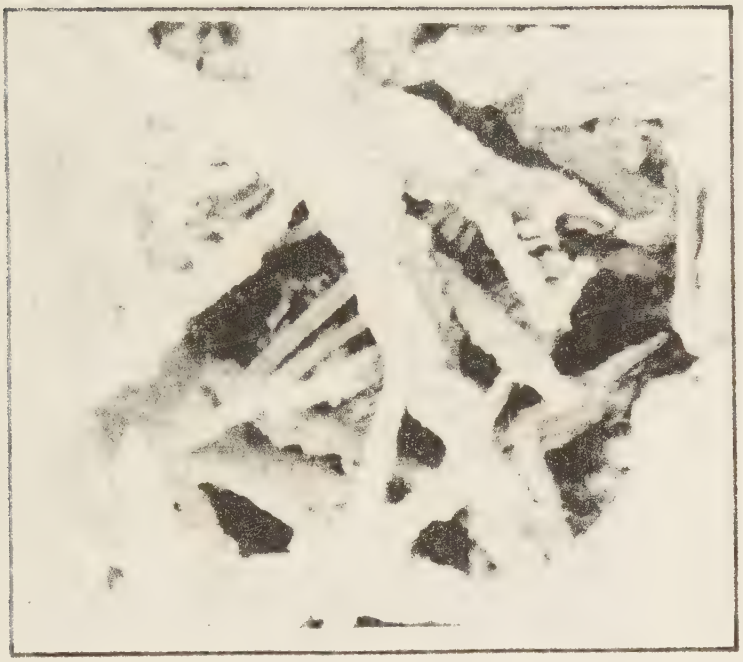


3,5 µ

Photo 10 (Agrandissement de la photo 9)

LŒSS_ORLY : Concrétions de calcite

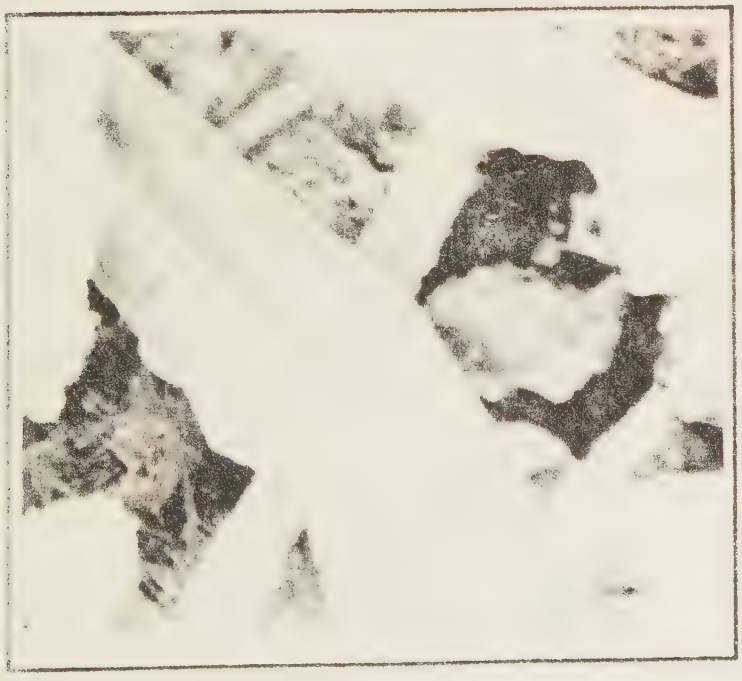
Fibres de type B



4 µ

Photo 11

La surface est rugueuse les contours déchiquetés
(cristallisation irréguliere ou début de dissolution ?)



2 µ

Photo 12

La fibre au centre semble un tube ouvert sur la tige centrale
On remarque dans le coin inférieur gauche un amas de fibres de taille plus réduite.

LOESS _ ORLY : structure

Aspect général

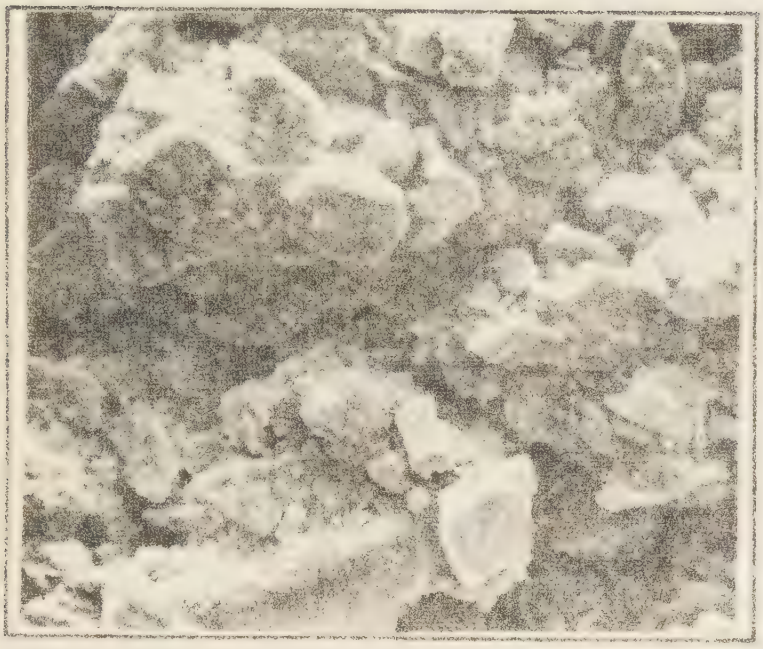


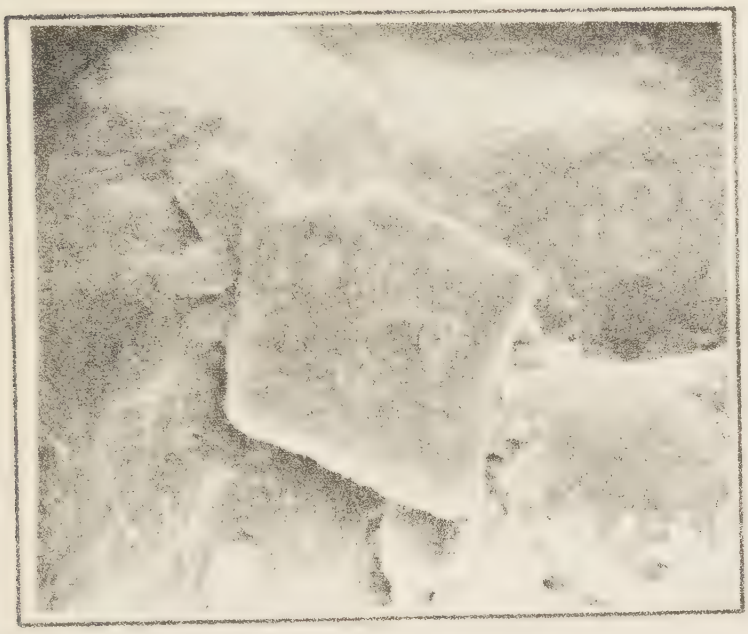
Photo 13

20 µ

Photo 14 (Agrandissement de la photo 13)

10 µ

Position de l'argile



1) Couverture argileuse autour des grains

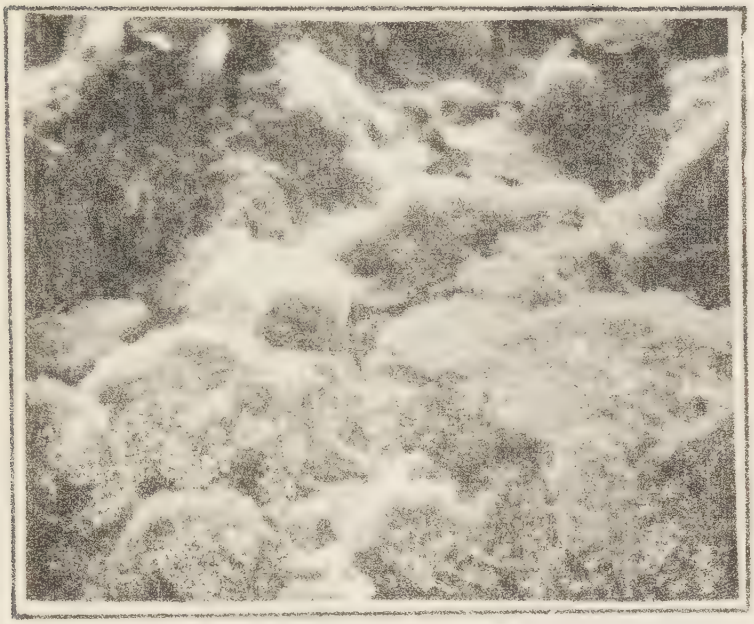
Photo 15

1,5 µ

2) Pont argileux entre grains

Photo 16

2 µ



10 µ

Photo 17

5 µ

Photo 18

LŒSS_ ROISSY : structure

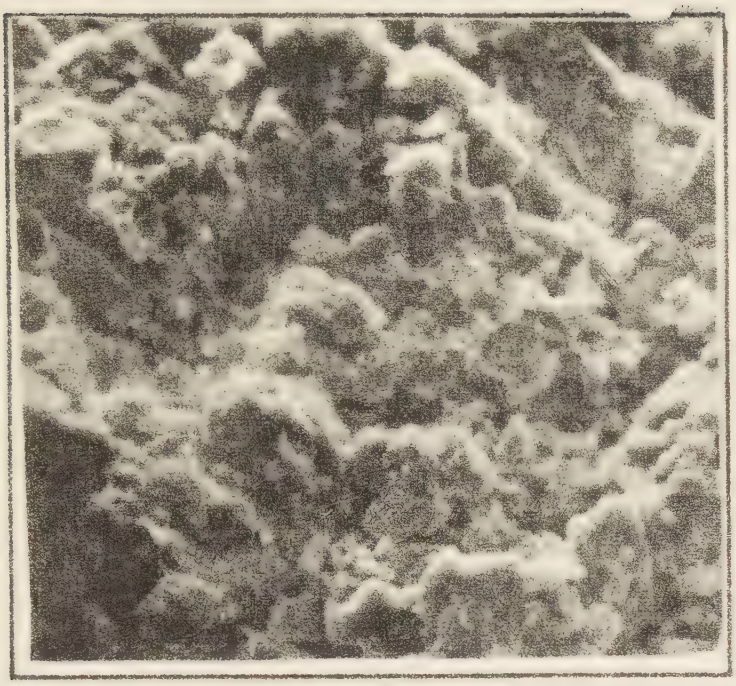


Photo 19

20 µ

Photo 20

10 µ

B. TABLEAUX DE RESULTATS

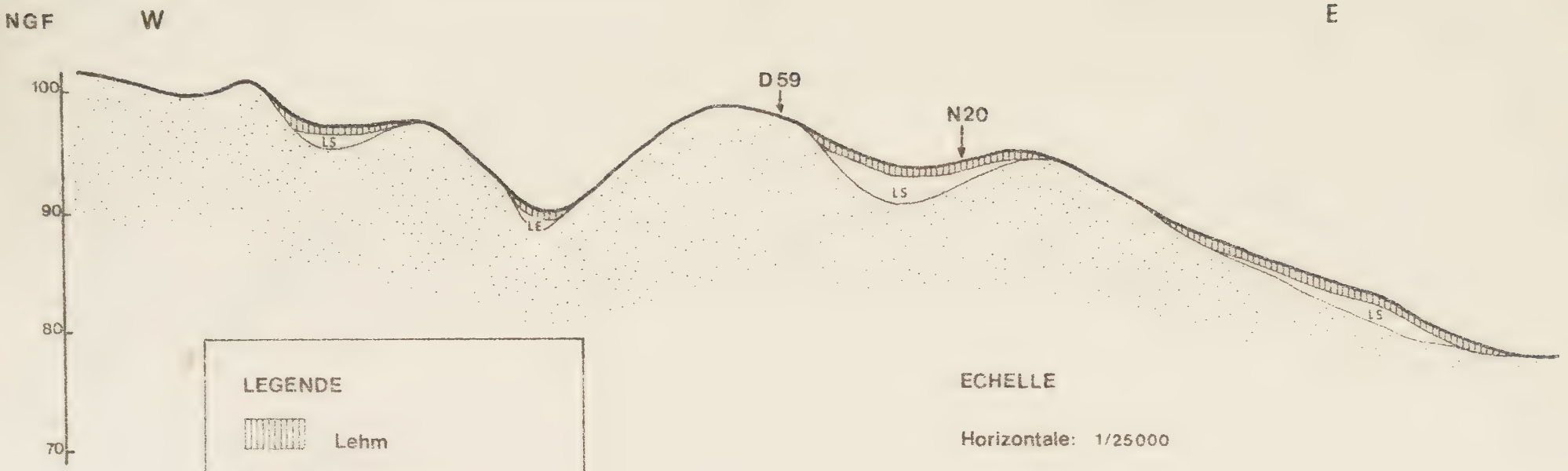
1/ ORLY.*

* La localisation des échantillons fait l'objet de l'annexe 1.

TABLEAU Nº 1.

Echelle stratigraphique des cinq premiers terrains rencontrés sous la surface du plateau d'Orly.

Désignation	Etage	Groupes ou séries	Notations sur la carte
Limon des plateaux	Paléolithique?	Pleistocène	L P
Sable de Fontainebleau	Stampien	Oligocène	g_2 b
Marnes à huitres	Stampien	Oligocène	g_2 b
Calcaire ou travertin supérieur	Sannoisien	Oligocène	g_1 b
Marnes vertes	Sannoisien	Oligocène	g_1 b



LEGENDE

- Lehm
- LS — Loess sableux
- LE — Loess éboulé
- Sable de Fontainebleau

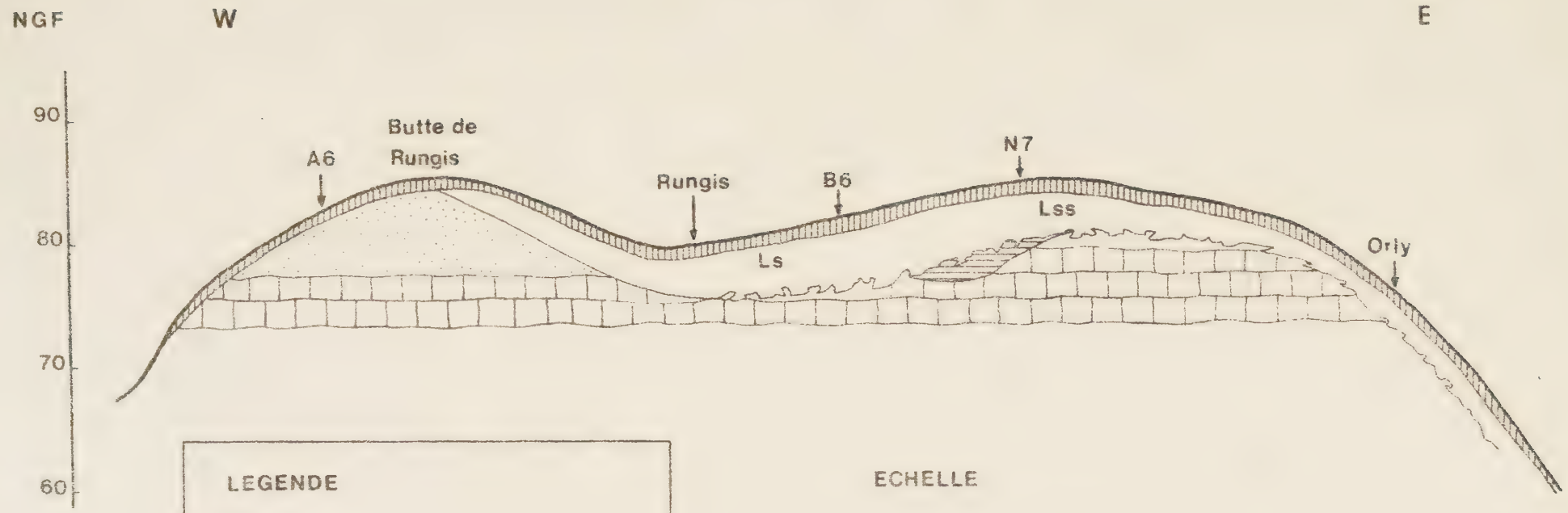
ECHELLE

Horizontale: 1/25000

Verticale: 1/500

Tableau N°2

Coupe W_E au nord de la butte de CHAUMONT



LEGENDE

- Lehm
- Ls — Loess sableux
- Lss — Loess sensu_stricto
- Mélange Loess marno_calcaire
- Marnes à huitres
- Sable de Fontainebleau
- Marno_calcaire de Brie

ECHELLE

Horizontale : 1/25000

Verticale : 1/500

Tableau N°3

Coupe W_E au droit de la butte de RUNGIS

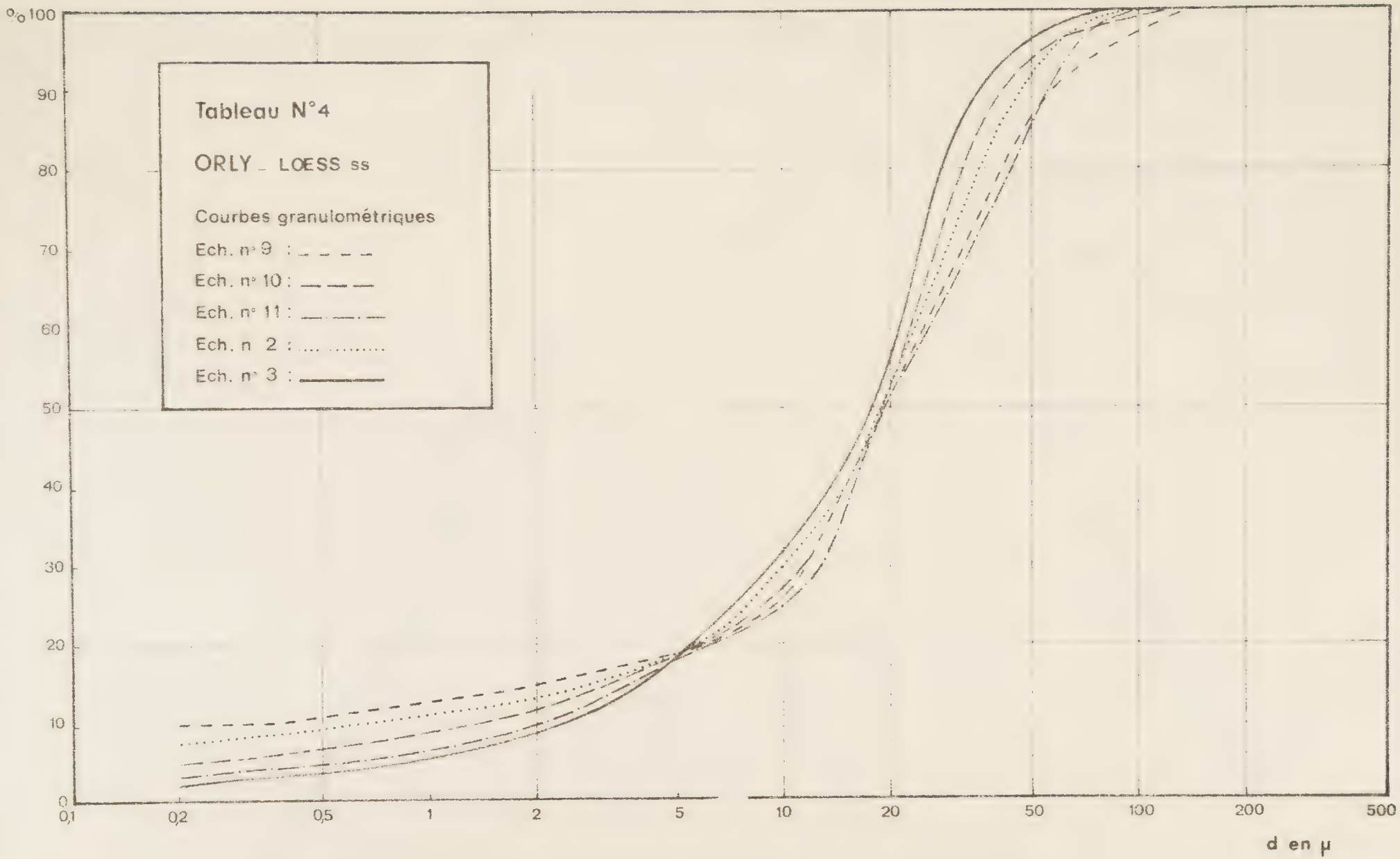


Tableau N°4
ORLY _ LOESS ss
Courbes granulométriques
Ech. n° 9 : _ _ _ _
Ech. n° 10 : — — —
Ech. n° 11 : — . — . —
Ech. n 2 : ....
Ech. n° 3 : ———
% 100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0,1
0,2
0,5
1
2
5
10
20
50
100
200
500
d en µ

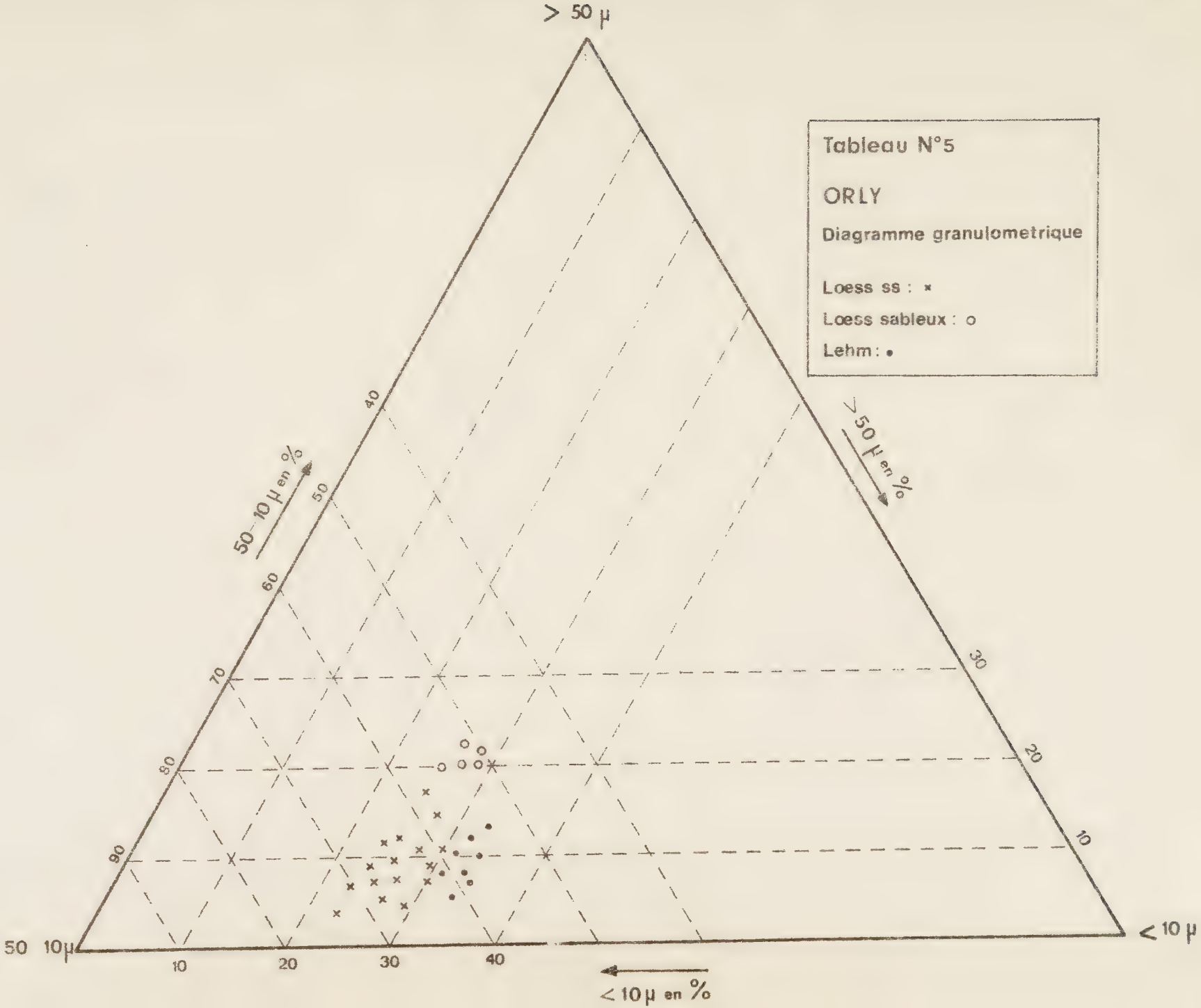

> 50 µ
Tableau N°5
ORLY
Diagramme granulometrique
Loess ss : ×
Loess sableux : o
Lehm : •
50-10 µ en %
> 50 µ en %
< 10 µ en %
50 10µ
< 10 µ
10
20
30
40
50
60
70
80
90
10
20
30
40

TABLEAU Nº 6.

Nº ech. / Minéraux	2	3	9	10	13	14	18
Quartz	ta	ta	ta	ta	ta	ta	ta
Feldspath	f	f	f	f	f	f	f
Calcite	f	f	a	a	a	a	f
Dolomie	t	t	p	p	p	p	p
Minéraux argileux	f	f	f	f	f	f	f

Minéralogie du loess ss. 'échantillon brut)

légende : ta = très abondant
a = abondant
f = faible
p = présent
t = trace

TABLEAU Nº 7

Nº ech. / Minéraux	2	3	9	10	13	14	18
Illite	6	6	6	6	5	5	6
Kaolinite	2	1	2	2	1	1	1
Montmorillonite	2	3	2	2	4	4	3
Interstratifiés			t	t		t	t

Minéralogie de la fraction argileuse du loess ss.
(proportion des minéraux estimés en parties sur 10 : t = traces)

TABLEAU Nº 8

LOESS ss - ORLY

analyse chimique

Ech. nº 9

Perte au feu	15,1%
Si 02	55,3
AL2 03	7,5
Fe2 03	2,0
Na2 0	0,88
K2 0	1,37
Ca 0	15,75
Mg 0	1,3

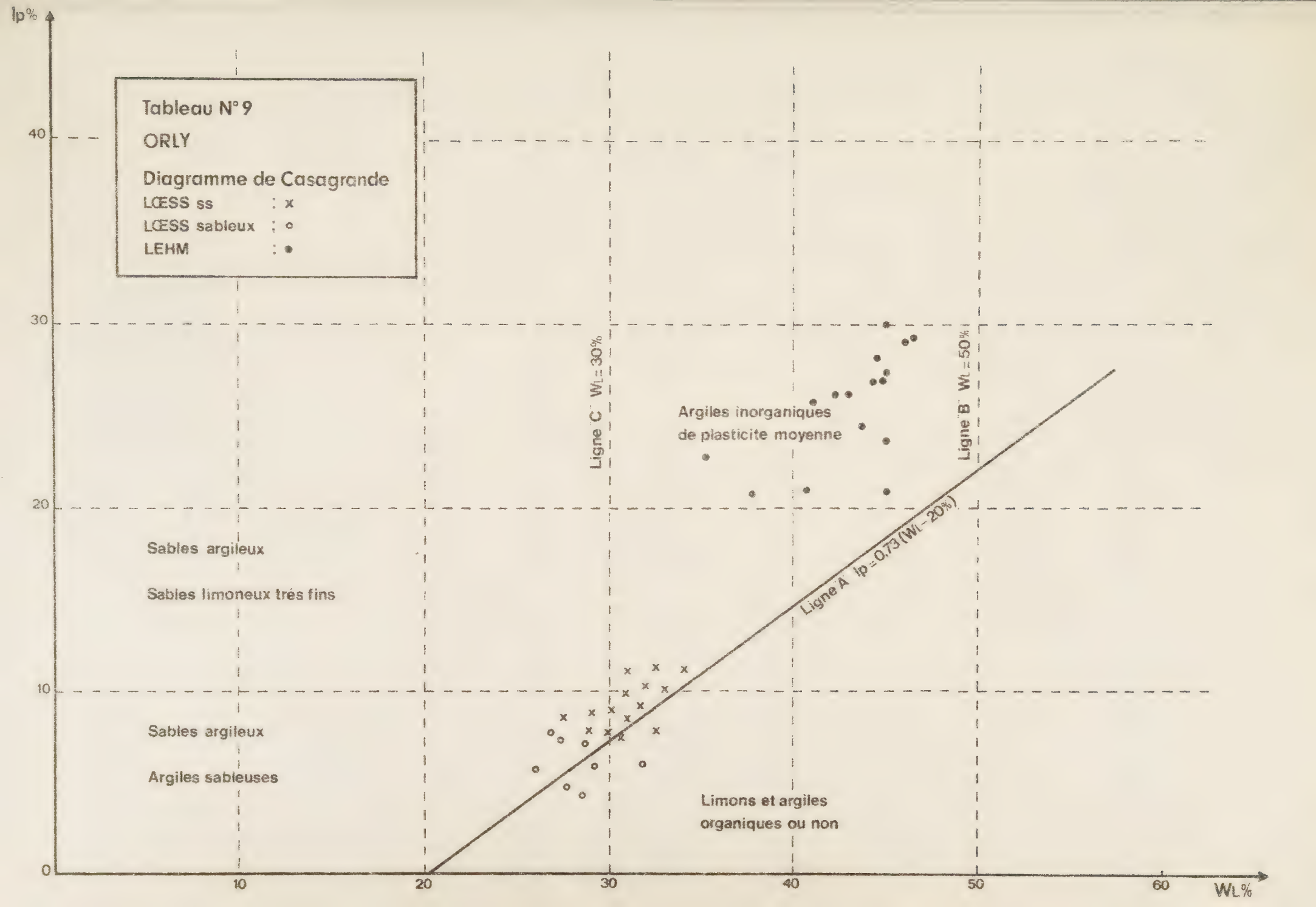

Ip%
Tableau N° 9
ORLY
Diagramme de Casagrande
LŒSS ss : x
LŒSS sableux : o
LEHM : •
Ligne C WL = 30%
Ligne B WL = 50%
Ligne A Ip = 0,73 (WL - 20%)
Argiles inorganiques
de plasticité moyenne
Sables argileux
Sables limoneux très fins
Sables argileux
Argiles sableuses
Limons et argiles
organiques ou non
0
10
20
30
40
50
60
WL%

TABLEAU N° IO

N° ech.	34	35	36	22	28	3I	38	37
K en m/sec.	$2xIO^{-7}$	$I,5xIO^{-7}$	$I,8xIO^{-7}$	$4xIO^{-7}$	$I,IxIO^{-7}$	$22xIO^{-7}$	$5,IxIO^{-7}$	$I,0xIO^{-7}$

Résultats des essais de perméabilité du loess ss - K = coefficient de perméabilité verticale.

TABLEAU N° II

Caractéristiques / N° ech.	Pc	Cc	Ig	Variations de i et r en %	W%	eo
22	2,0	0,I26	0,00I		2I,0	0,63
28	2,2	0,204	0,00I		20,0	0,67
3I	2,8	0,300	0,00I		I8,5	0,75
38	I,6	0,I80	0,00I			
36	2,6	0,200	0,00I	40 ≤ i ≤ 65 25 ≤ r ≤ 40	20,0	0,64
37	I,5	0,I30	0,00I	40 ≤ i ≤ 60 20 ≤ r ≤ 40	2I,6	0,63
34	2,7	0,I50	0,00I		I9,0	0,62
35	I,8	0,I30	0,00I		22,2	0,60

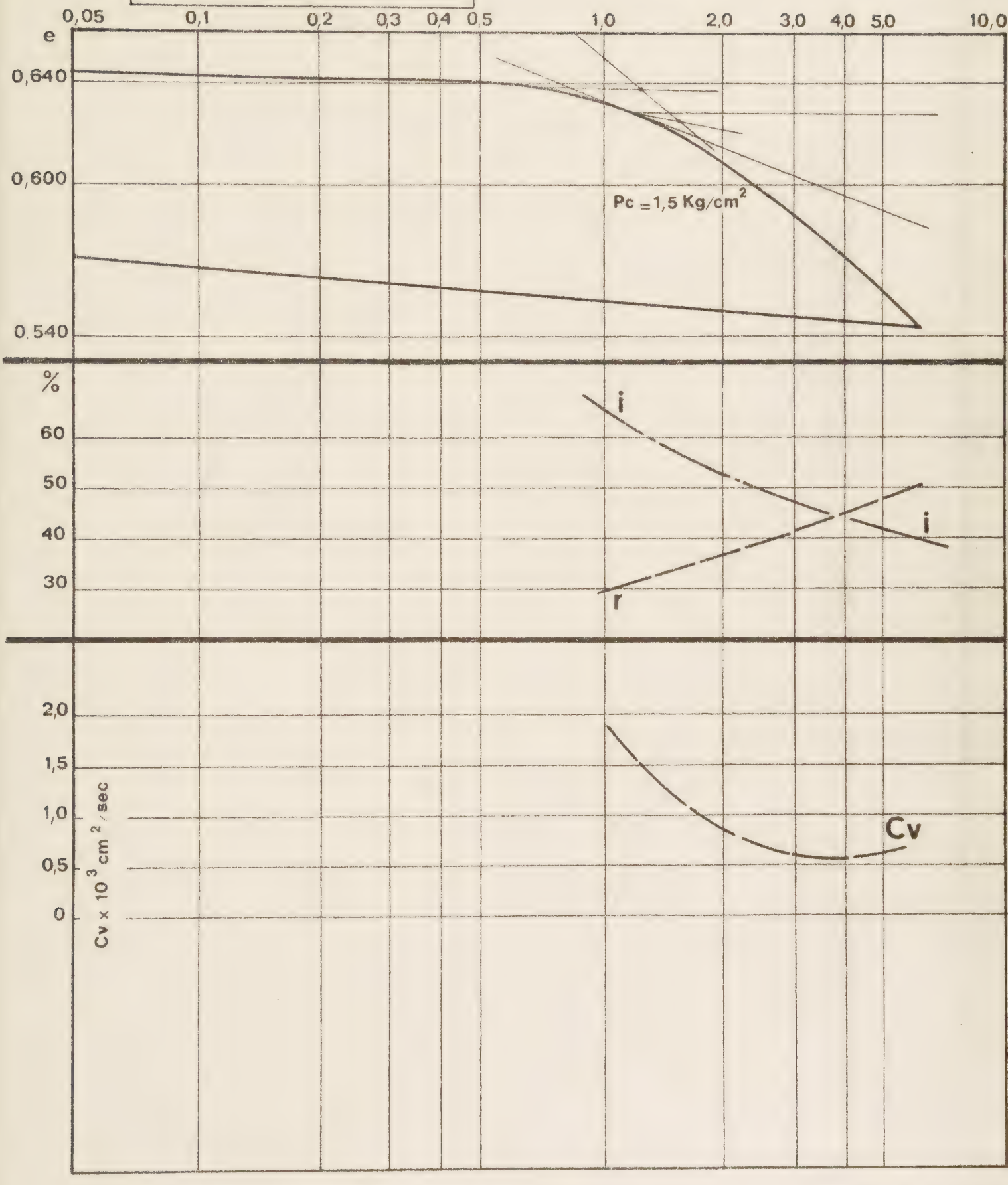
Résultats des essais à l'oedomètre sur le loess ss.

Légende : Pc : Pression de consolidation
Cc : Coefficient de compressibilité
Ig : indice de gonflement
i : tassement instané
W : teneur en eau naturelle
eo : indice des vides initial

Tableau N° 12

ORLY — LŒSS ss

Courbes à l'œdomètre / Ech. n° 37



PRESSION EN Kg/CM²

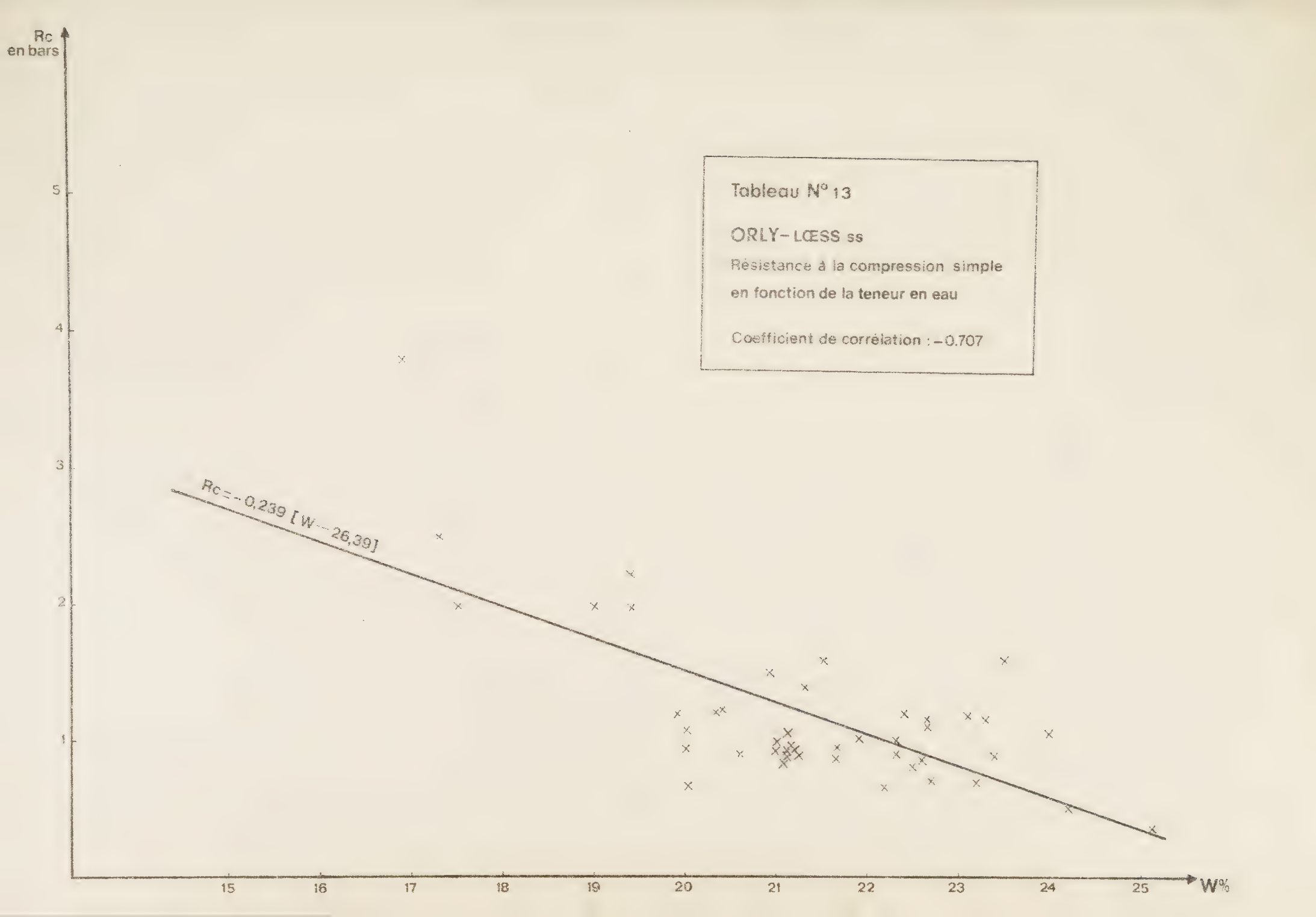


Tableau N° 13

ORLY – LŒSS ss

Résistance à la compression simple en fonction de la teneur en eau

Coefficient de corrélation : – 0.707

TABLEAU Nº 14

Nº ech	ϕi en degré	Ci	ϕa en degré	Ca
25	34	1	25	2
27	28,3	1,3	23	1,8
28	32	0	8	0,35
29			23	1,8

Résultats des essais au triaxial (non consolidé rapide) du loess ss.

Légende : ϕi = angle de frottement intergranulaire
ϕa = angle de frottement apparent
Ci = cohésion intergranulaire
Ca = cohésion apparente.

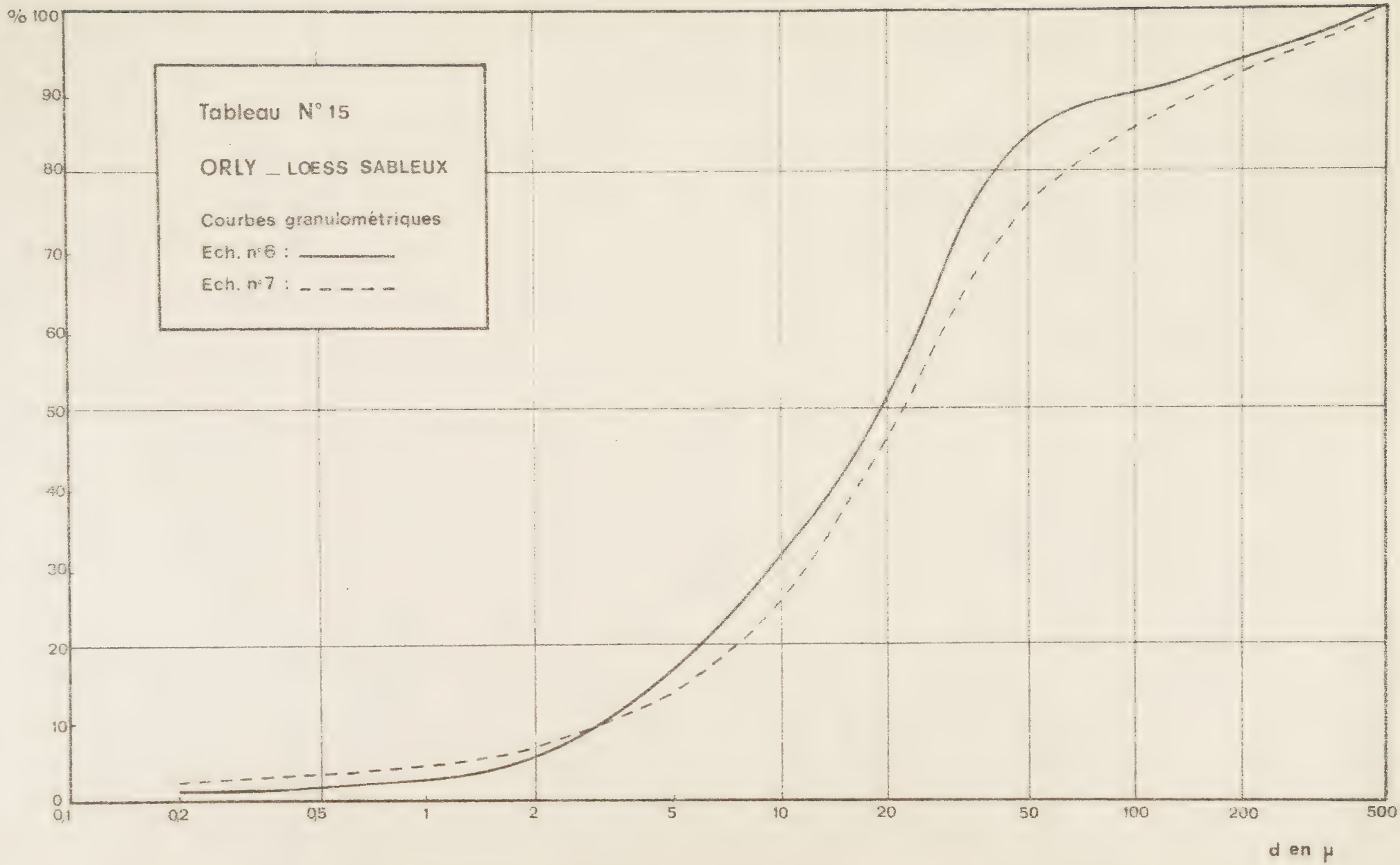


Tableau N° 15
ORLY _ LOESS SABLEUX
Courbes granulométriques
Ech. n°6 :
Ech. n°7 :
% 100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0,1
0,2
0,5
1
2
5
10
20
50
100
200
500
d en µ

TABLEAU N° I6

Nº ech / minéraux	6	7
Quartz	ta	ta
Feldspath	f	f
Calcite	f	f
Dolomie		
Minéraux argileux	p	f

légende :

ta = très abondant
a = abondant
f = faible
p = présent
t = traces

Minéralogie du loess sableux
(échantillon brut)

TABLEAU N° I7

Nº ech / Minéraux	6	7
Illite	6	6
Kaolonite	2	1
Montmoril-lonite	2	3
Interstra-tifiés	2	3

Minéralogie de la fraction argileuse du loess sableux.
(estimations en parties sur 10)

Tableau N° 18

ORLY _ MELANGE SABLE _ LŒSS

Courbes à l'œdomètre / Ech. n° 38

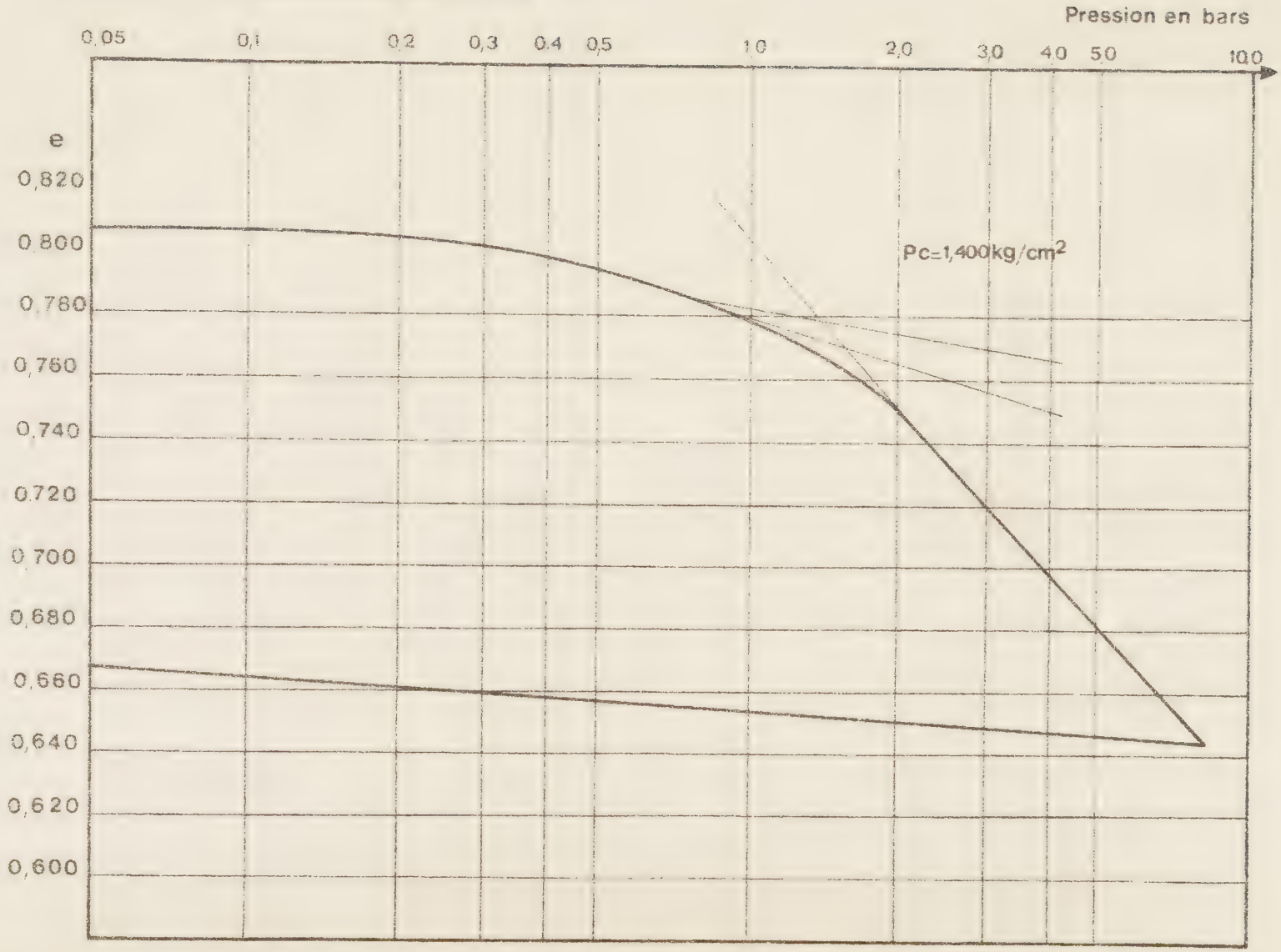


TABLEAU Nº 19

Nº ech	Pc	Cc	Ig	Variat. de i et r en %	W%	eo
30	2,0	0,110	0,001	2	21,0	0,605
32	2,3	0,220	0,001		20,0	0,730
33	3,5	0,200	0,001	42 i+r/65	17,5	0,700
26	2,3	0,301	0,001		21,3	0,790

Résultats des essais à l'oedomètre dans le loess sableux.

Légende : Pc = pression de consolidation
Cc = coefficient de compressibilité
Ig = indice de gonflement
i = tassement instantané
r = tassement primaire
W = teneur en eau naturelle
eo = indice des vides.

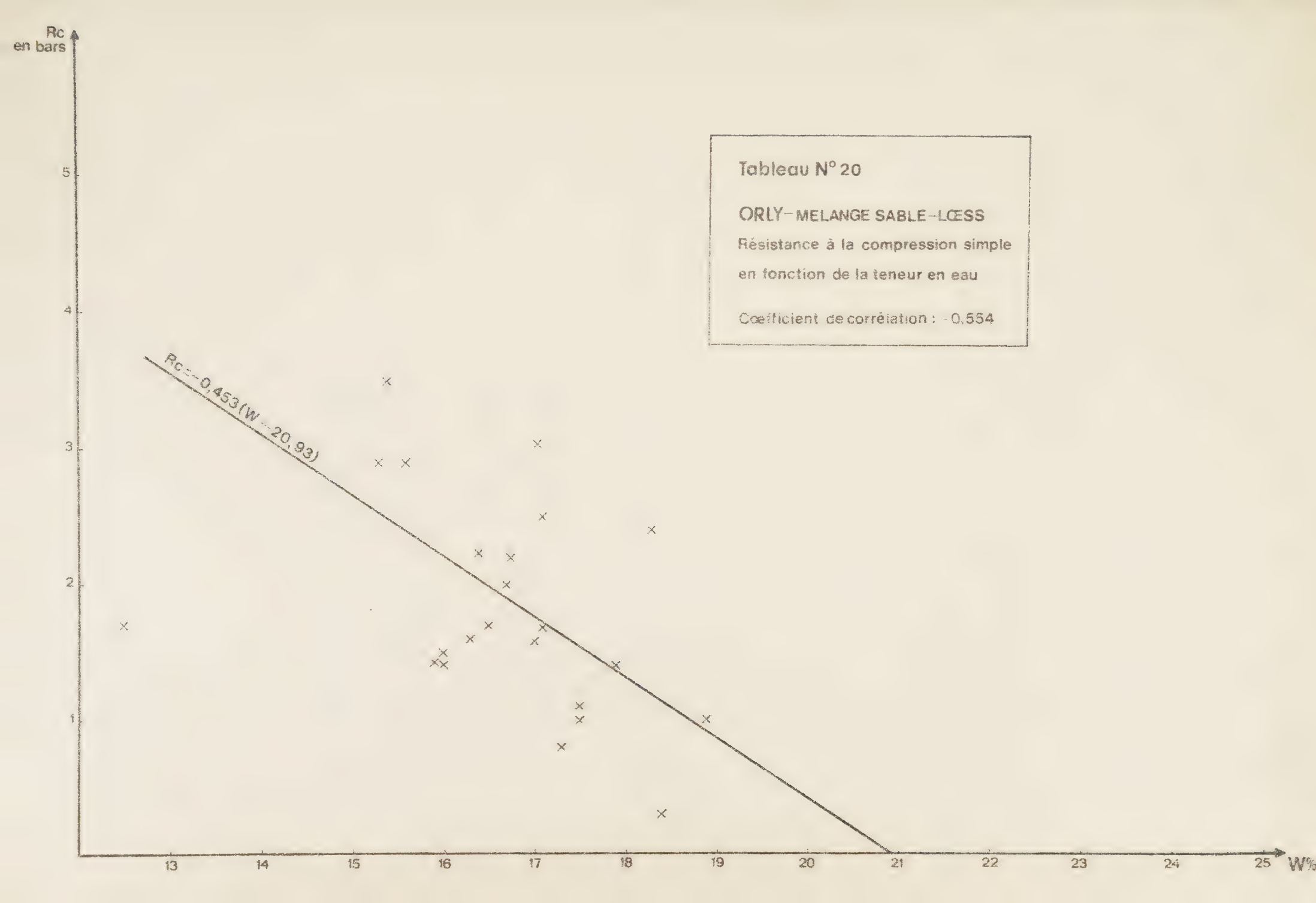


Tableau N° 20

ORLY – MELANGE SABLE–LŒSS

Résistance à la compression simple en fonction de la teneur en eau

Coefficient de corrélation : - 0,554

TABLEAU Nº 21

Nº ech	K en m/sec
30	40×10^{-7}
32	2×10^{-7}
33	4×10^{-7}
26	$2,5 \times 10^{-7}$

Résultats des essais de perméabilité dans le loess sableux.

K = coefficient de perméabilité verticale.

TABLEAU Nº 22

Nº ech	ϕ i	C	ϕ a	Ca
26	28	0,25	12	0,45

Résultats des essais au triaxial (non consolidé rapide) dans le loess sableux.

Légende : ϕ i = angle de frottement intergranulaire
ϕ a = angle de frottement apparent
C = cohésion intergranulaire
ϕ = angle de frottement intergranulaire.

TABLEAU Nº 23

Nº ech / Minéraux	4	11	15	16	19
Quartz	ta	ta	ta	ta	ta
Feldspath	f	f	f	f	f
Calcite	f	f	p	p	p
Dolomie	t	p	p	p	p
Minéraux argileux	f	f	f	f	f

Minéralogie du loess de la zone de mélange avec le marno-calcaire (échantillon brut)

Légende : ta = très abondant
a = abondant
f = faible
p = présent
t = traces.

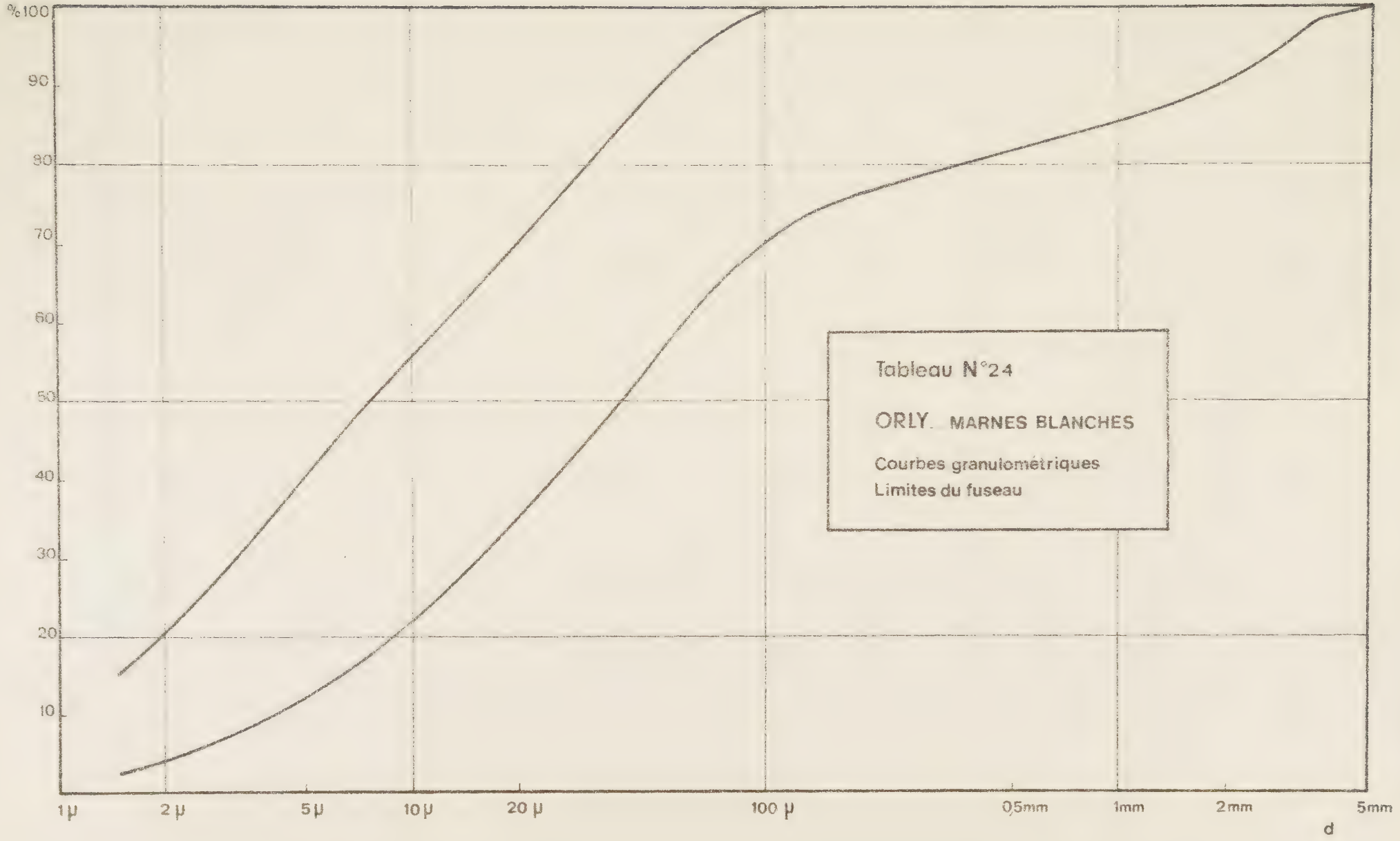
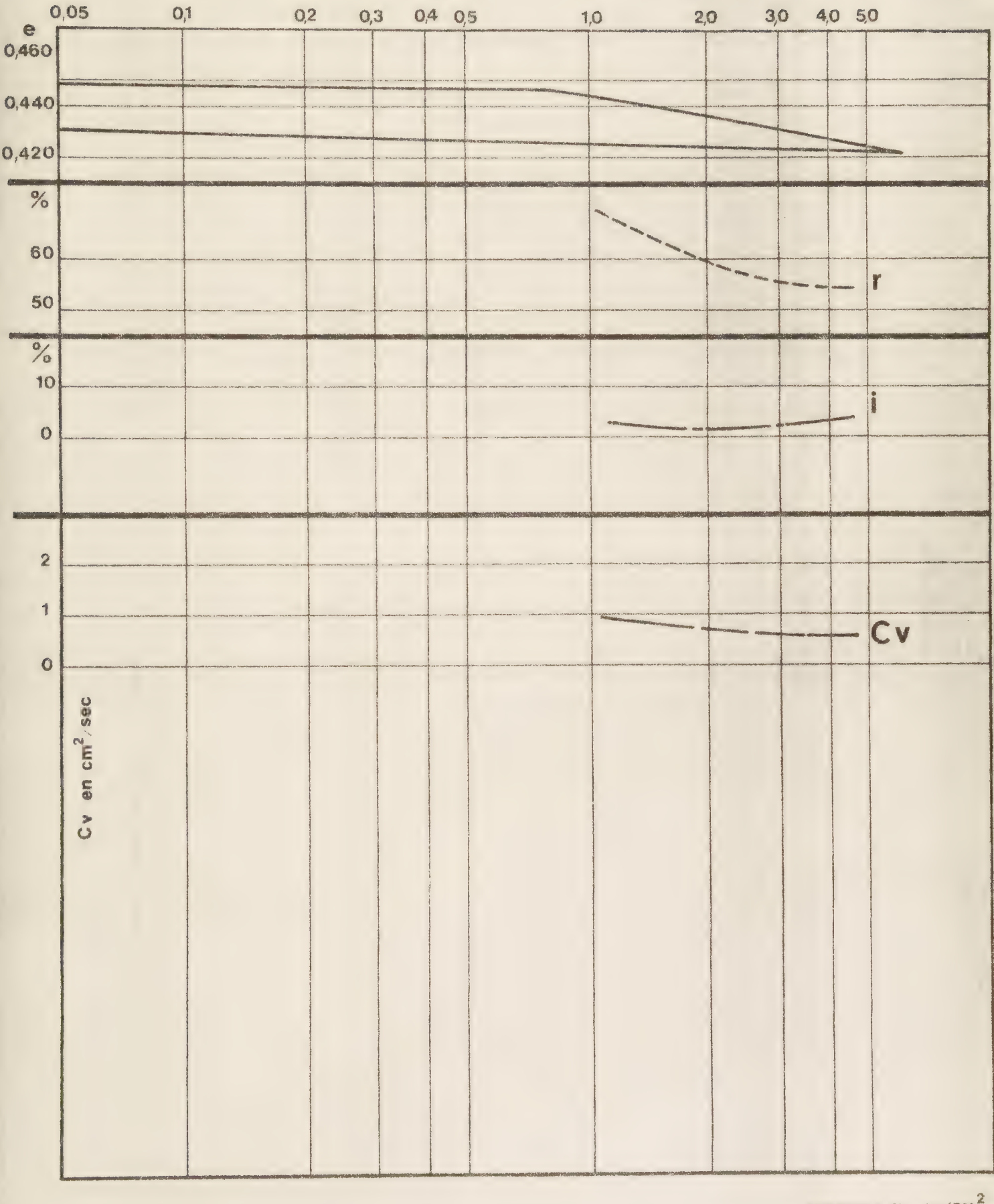

%100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
1 µ
2 µ
5 µ
10 µ
20 µ
100 µ
0,5mm
1mm
2mm
5mm
d
Tableau N°24
ORLY. MARNES BLANCHES
Courbes granulométriques
Limites du fuseau

Tableau N°25

ORLY — MARNES BLANCHES

Courbes à l'œdomètre Ech. N°25



PRESSION EN Kg/CM²

TABLEAU Nº 26

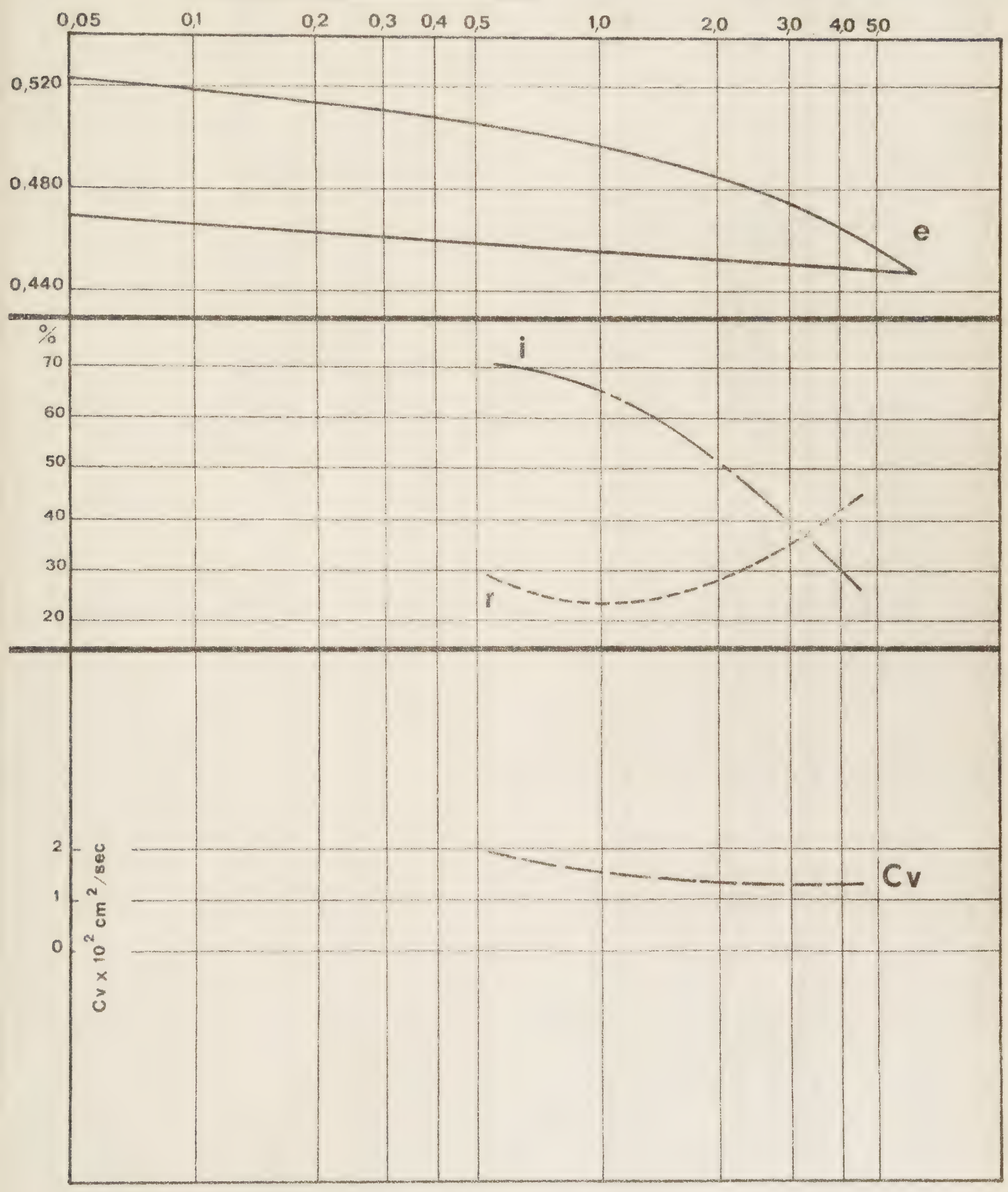
Nº ech	W_l	W_p	I_p
21	46,7	26,0	20,7
24	30,6	23,3	7,3
39	37,7	14,1	17,6
40	24,4	18,5	5,9
41	29,1	20,3	8,8
42	31,2	15,8	15,5
43	34,7	14,8	19,9
44	33,9	14,0	19,9
46	34,3	13,9	20,4

Limites d'Atterberg dans
la mélange marno-calcaire-
loess.

Tableau N°27

ORLY _ MELANGE LŒSS MARNO_CALCAIRE

Courbes à l'œdomètre Ech. n°46



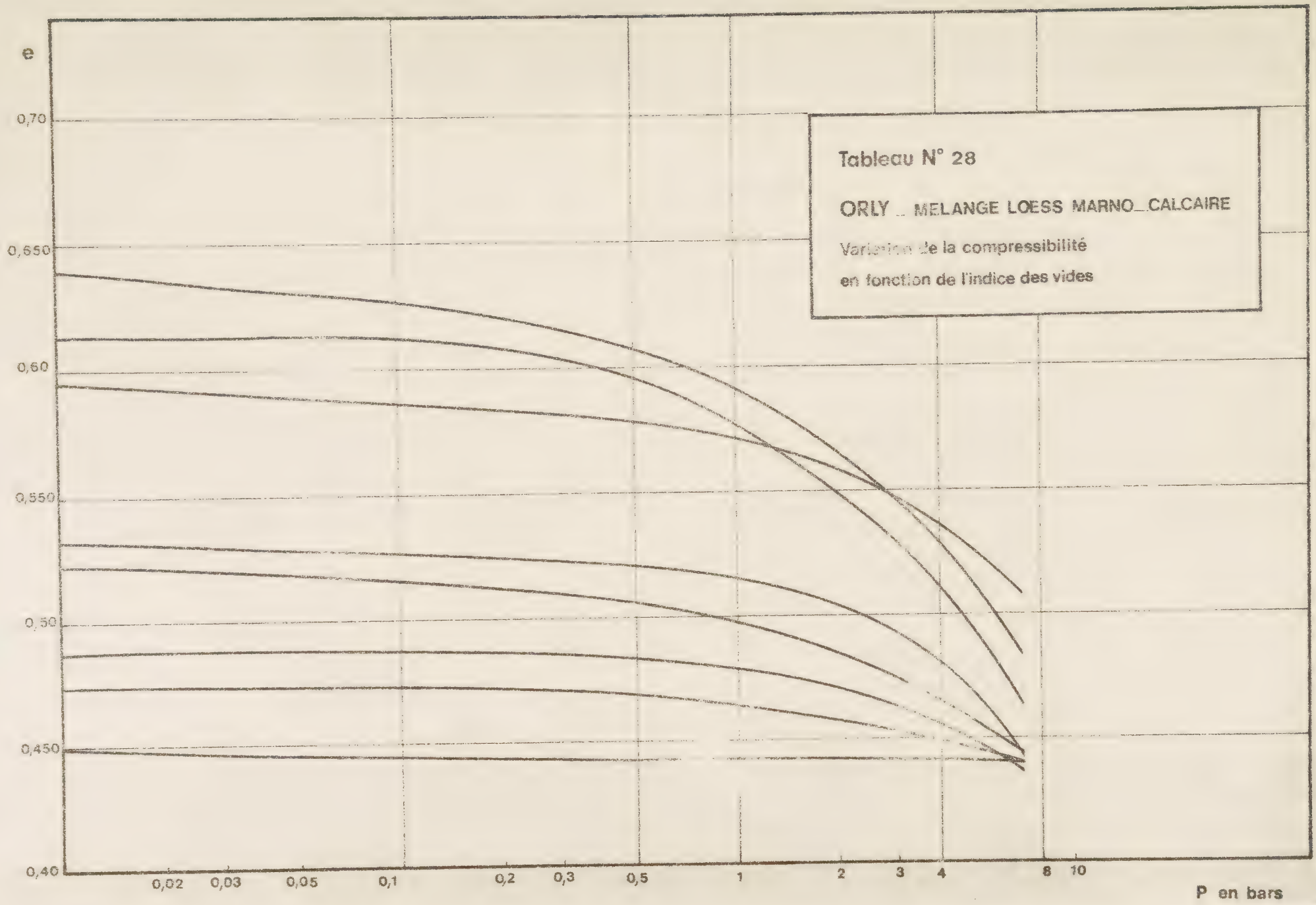

e
0,70
0,650
0,60
0,550
0,50
0,450
0,40
0,02
0,03
0,05
0,1
0,2
0,3
0,5
1
2
3
4
8
10
P en bars
Tableau N° 28
ORLY _ MELANGE LOESS MARNO_CALCAIRE
Variation de la compressibilité
en fonction de l'indice des vides

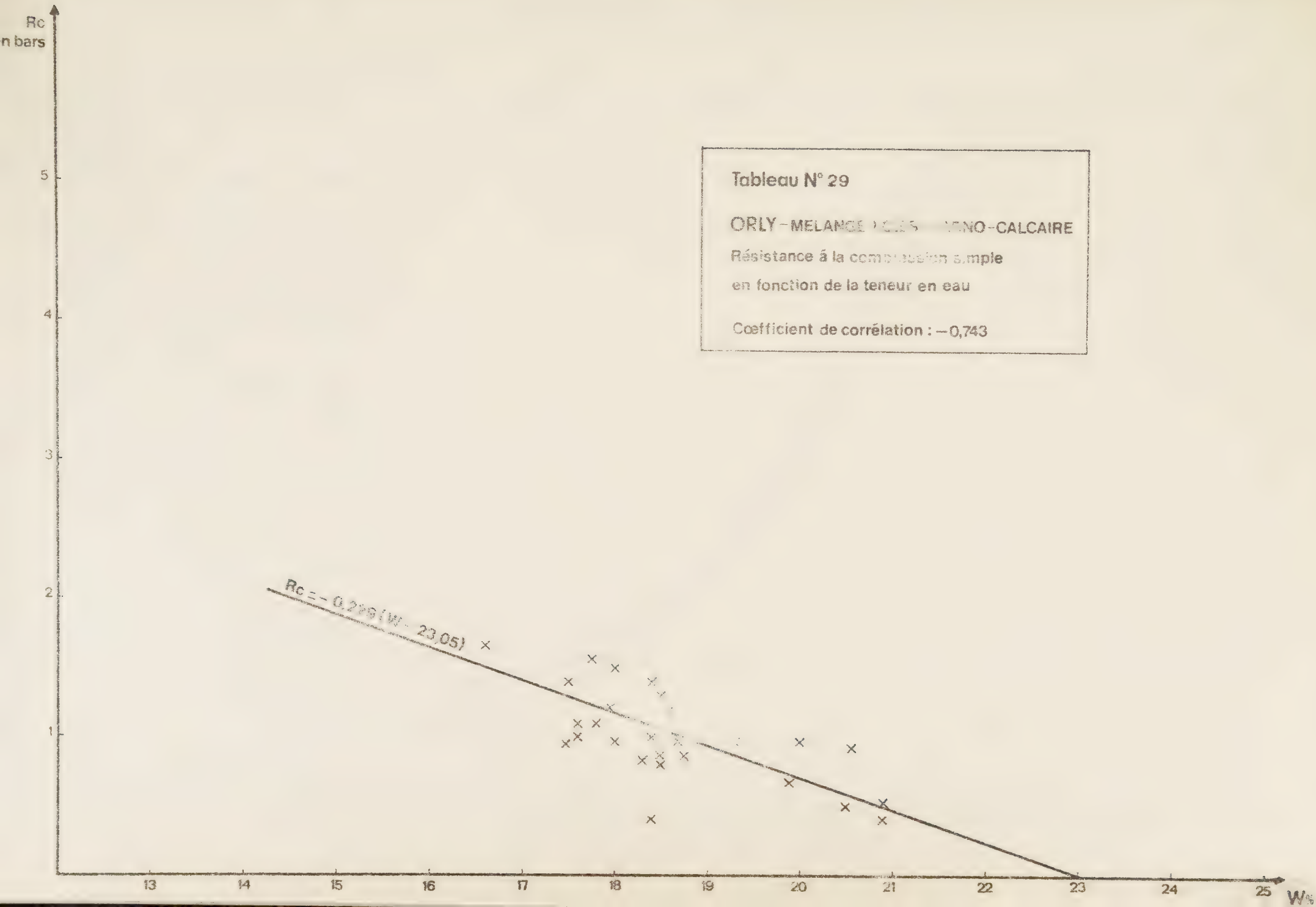
Tableau N° 29

ORLY – MELANGE [illegible]NO-CALCAIRE

Résistance à la compression simple

en fonction de la teneur en eau

Coefficient de corrélation : – 0,743



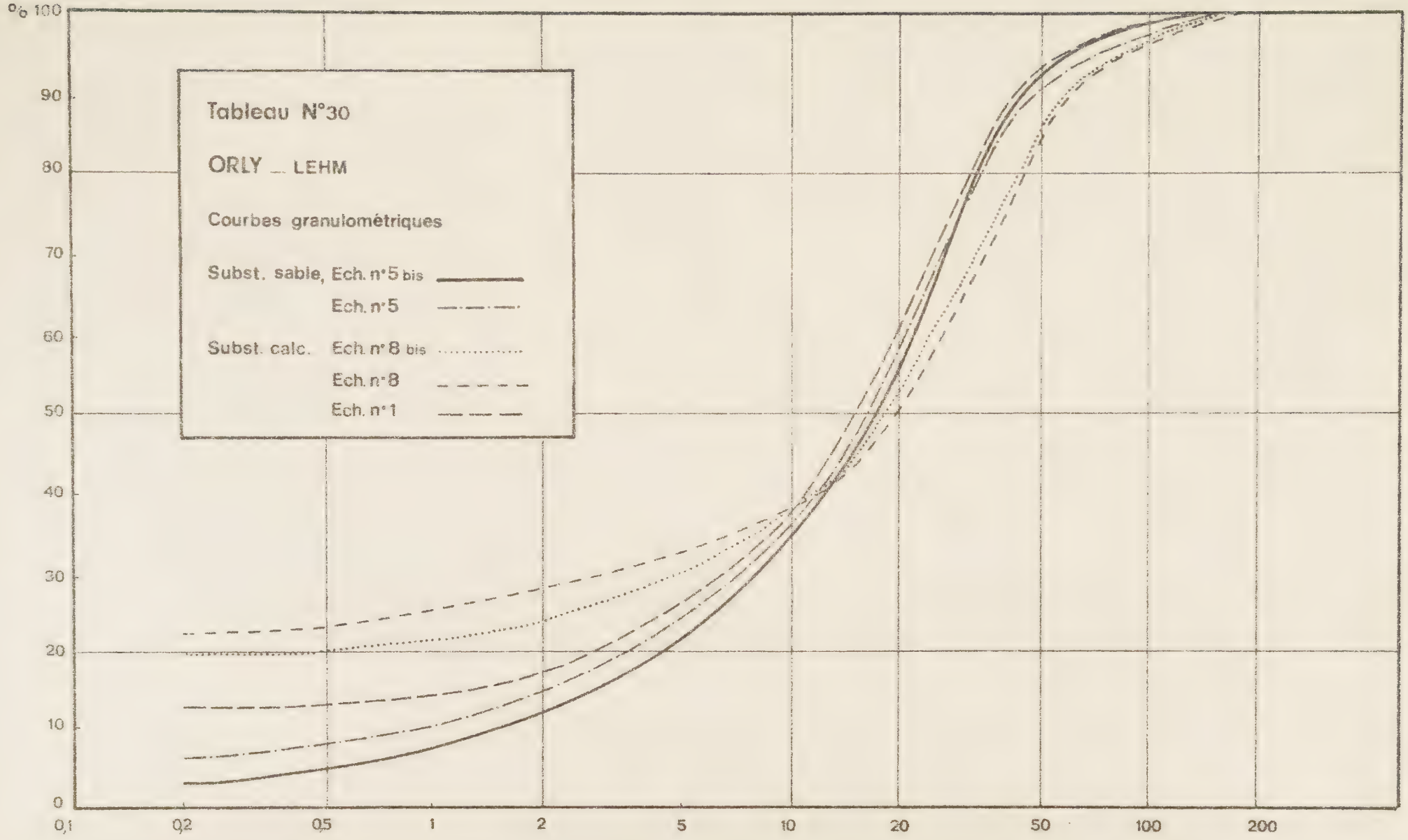

%
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0,1
0,2
0,5
1
2
5
10
20
50
100
200
Tableau N°30
ORLY _ LEHM
Courbes granulométriques
Subst. sable, Ech. n°5 bis
Ech. n°5
Subst. calc. Ech. n°8 bis
Ech. n°8
Ech. n°1

TABLEAU Nº 31

Nº ech / Minéraux	1	5	5bis	8	8bis	17
Quartz	ta	ta	ta	ta	ta	ta
Feldspath	f	p	p	p	p	p
Calcite	f	p	p	p	p	p
Dolomie	f	p	p	p	p	p
Minéraux argileux	f	f	a	f	a	a

Minéralogie du lehm
(échantillon brut)

Légende : ta = très abondant
a = abondant
f = faible
p = présent
t = trace

TABLEAU Nº 32

Perte au feu	1,8
Si 02	69,4
Al2 03	11,2
Fe2 03	4,0
Na2 0	0,88
K2 0	2,0
Ca 0	0,3
Mg 0	0,8

Analyse chimique du lehm (éch. Nº 8 bis)

TABLEAU Nº 33

Nº ech / Minéraux	1	5	5bis	8	8bis	17
Illite	6	6	6	5	4	6
Kaolinite	2	2	1	2	1	1
Montmorillonite	1	2	3	2	4	2
Interstratifiés	1	t	t	1	1	1

Minéralogie de la fraction argileuse
du lehm
(estimation en partie sur 10.)

TABLEAU Nº 34

Nº ech	K en m/sec
37 bis	$3,0 \times 10^{-10}$
27 bis	$4,0 \times 10^{-11}$
29 bis	$1,0 \times 10^{-10}$

Essais de perméabilité dans le lehm

(K = coeff. de perméabilité verticale.)

Tableau N° 35

ORLY — LEHM

Courbes à l'œdomètre / Ech. N°46 bis

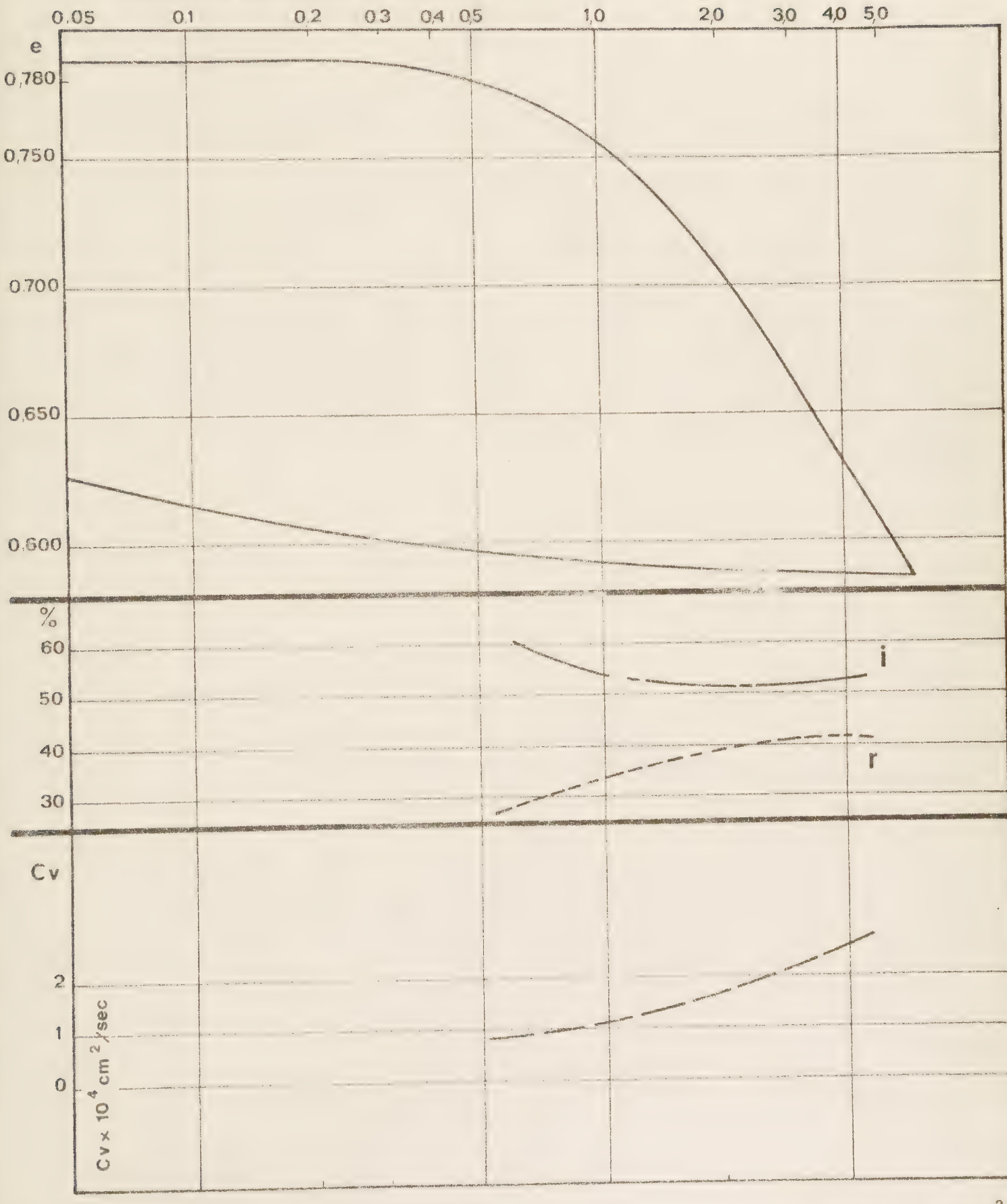


TABLEAU Nº 36

Nº ech	Pc	Cc	Ig	variations de i et r.	W%	eo
46bis	1,28	0,22	0,001	$52 \leq i \leq 62$ $25 \leq r \leq 42$	21,5	0,71
29bis	2,2	0,31	0,001		18,9	0,76
37bis	0,9	0,21	0,001	$55 \leq \frac{i}{r} \leq 80$	23,0	0,62
50	2,2	0,17	0,001		19,6	0,62
27bis	1,1	0,16	0,001		21,3	0,59
51	3,0	0,15	0,001		17,5	0,61

Résultats des essais à l'oedomètre
sur le lehm

Légende :

Pc = pression de consolidation
Cc = coefficient de compressibilité
Ig = indice de gonflement
i = tassement instantané
r = tassement primaire
W = teneur en eau
e = indice des vides initial.

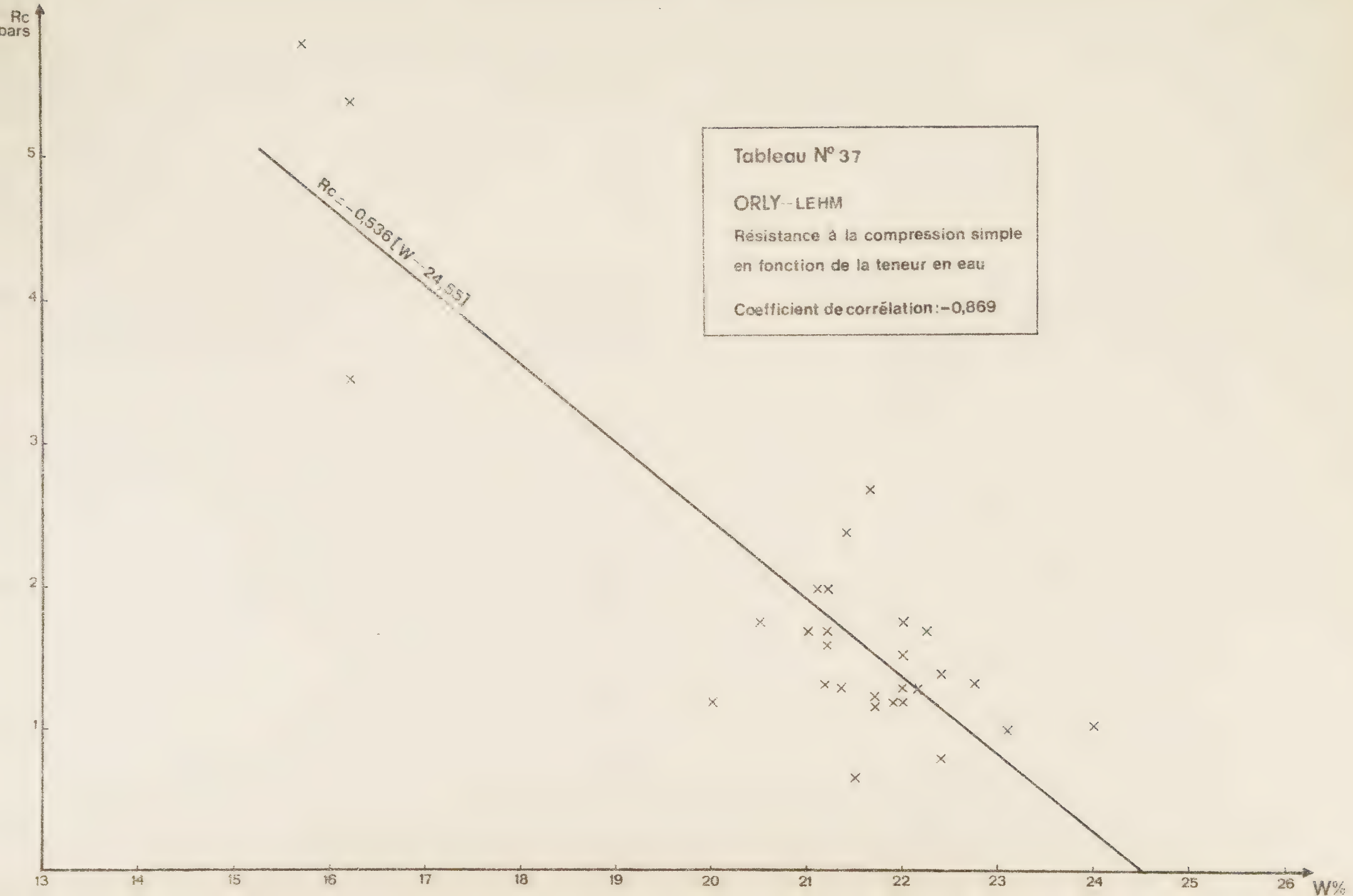


Tableau N° 37

ORLY--LEHM

Résistance à la compression simple en fonction de la teneur en eau

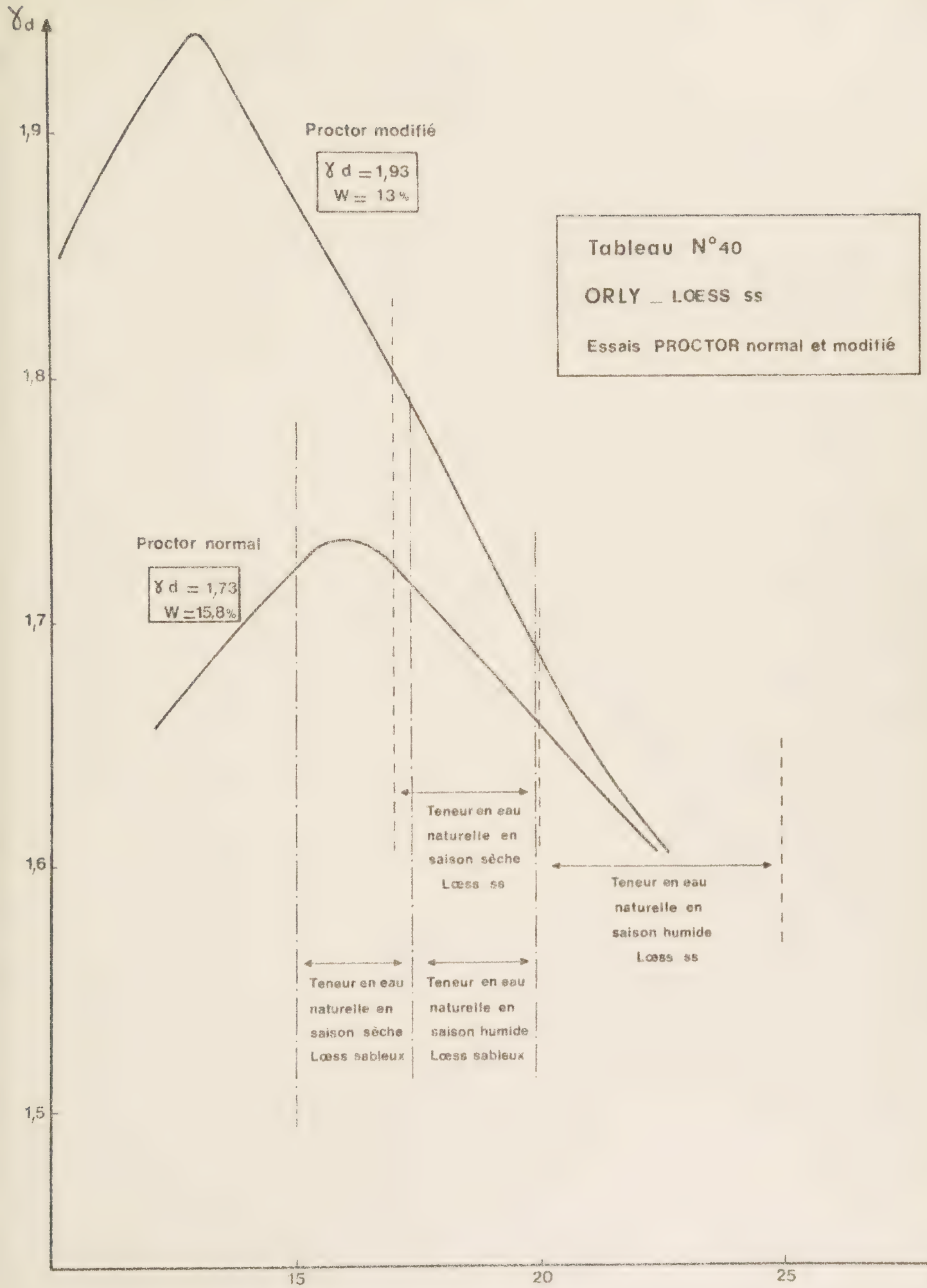
Coefficient de corrélation : -0,869

TABLEAU Nº 38

Nº ech	ϕ i	C i	ϕ a	C a
29 bis	27,30	1,8	23	1,8
46 bis	20	0,32	10	0,64
48	27,30	1,8	27,30	1,8
49	22	0,36	77	0,46

Résultats des essais au triaxial
(non consolidé rapide) dans le
lehm.

Légende : ϕ i = angle de frottement intergranulaire en degré
ϕ a = angle de frottement apparent en degré
Ci = cohésion intergranulaire
Ca = cohésion apparente.


γd
1,9
1,8
1,7
1,6
1,5
Proctor modifié
γ d = 1,93
W = 13 %
Proctor normal
γ d = 1,73
W = 15,8 %
Tableau N°40
ORLY _ LŒSS ss
Essais PROCTOR normal et modifié
Teneur en eau naturelle en saison sèche Lœss ss
Teneur en eau naturelle en saison humide Lœss ss
Teneur en eau naturelle en saison sèche Lœss sableux
Teneur en eau naturelle en saison humide Lœss sableux
15
20
25
W %

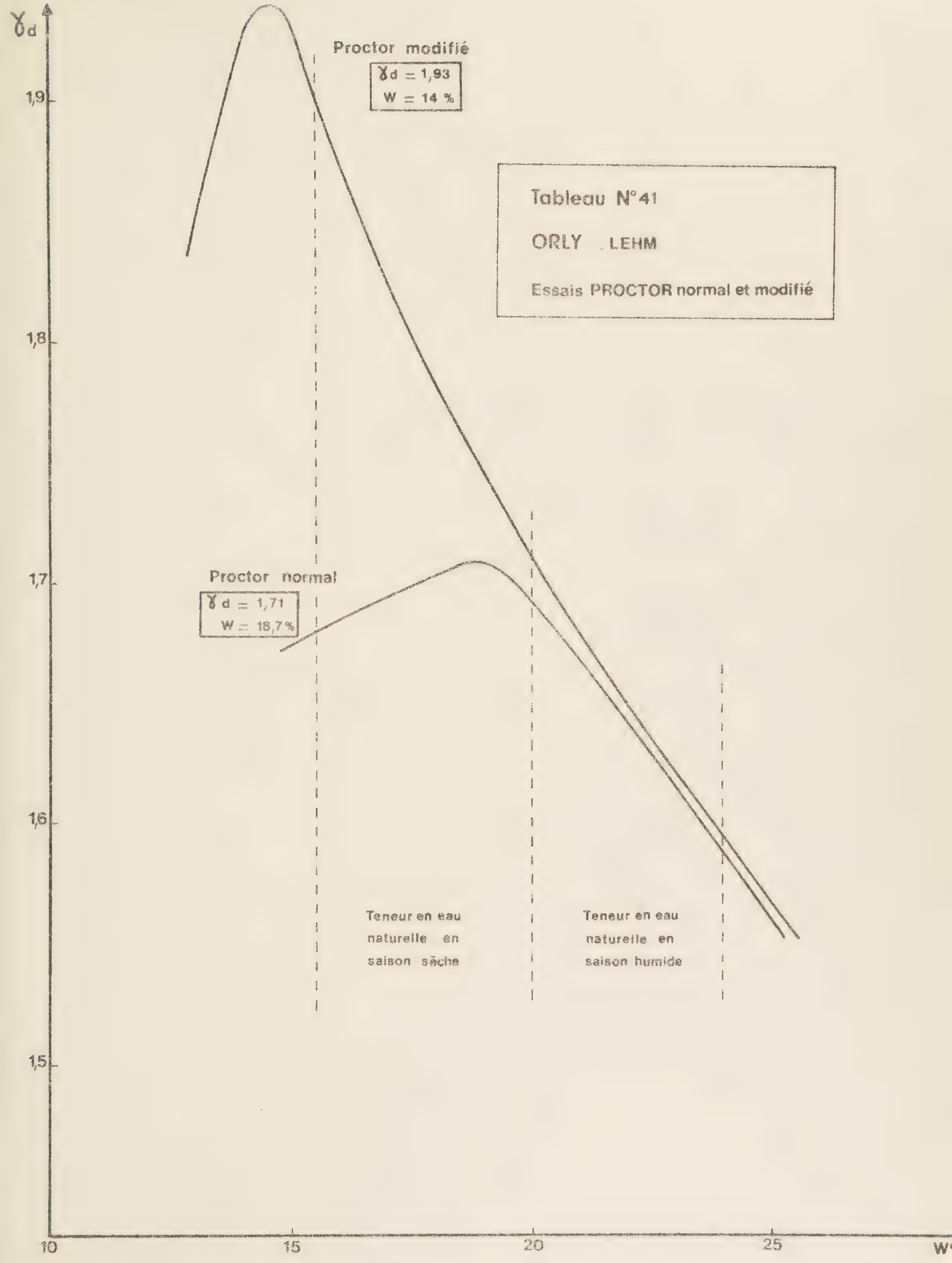

γd
1,9
1,8
1,7
1,6
1,5
Proctor modifié
γd = 1,93
W = 14 %
Proctor normal
γd = 1,71
W = 18,7 %
Tableau N°41
ORLY _ LEHM
Essais PROCTOR normal et modifié
Teneur en eau naturelle en saison sèche
Teneur en eau naturelle en saison humide
10
15
20
25
W%

TABLEAU Nº 43

Terrassement et compactage à W % naturelle
pour les différentes couches.

Sols	Terrassement		Compactage remblai	
	S. sèche	S. humide	saison sèche	saison humide
Lehm	aisé	difficile	γ d.opt PN atteint pour énergie PN	γd.opt PN impossible à atteindre.
Loess ss	aisé	difficile	γd.opt PN atteint pour énergie PN	d.opt PN impossible à atteindre
Loess sableux sur substratum sableux	aisé	aisé	γd.opt PN pour énergie PN	γd.opt PN pour énergie PM
Mélange (estimations)	aisé	difficile	γd. opt PN pour énergie PN PM	γd. opt PN impossible à atteindre

B. TABLEAUX DE RESULTATS

2/ ROISSY-EN-FRANCE

La localisation des echantillons fait l'objet de l'annexe2

TABLEAU Nº 45

Echelle stratigraphique des cinq premiers terrains rencontrés sous la surface du plateau de Roissy-en-France.

Désignation	Etage	Groupe ou série	Notation sur la carte.
Limon de plateau	paléolithique	Pleistocène	LP
Marnes et marnes du gypse	Ludien sup. Bartonien sup.	Eocène	e7a
Marnes et sables infra-gypseux	Bartonien sup. Ludien inf.	Eocène	e6e
Calcaire de St Ouen	(Bartonien) Marinésien	Eocène	e6d
Sables de Beauchamp	(Bartonien) Auversien	Eocène	e6c - e6b
Marnes et Caillasses	Lutétien sup.	Eocène	e5d

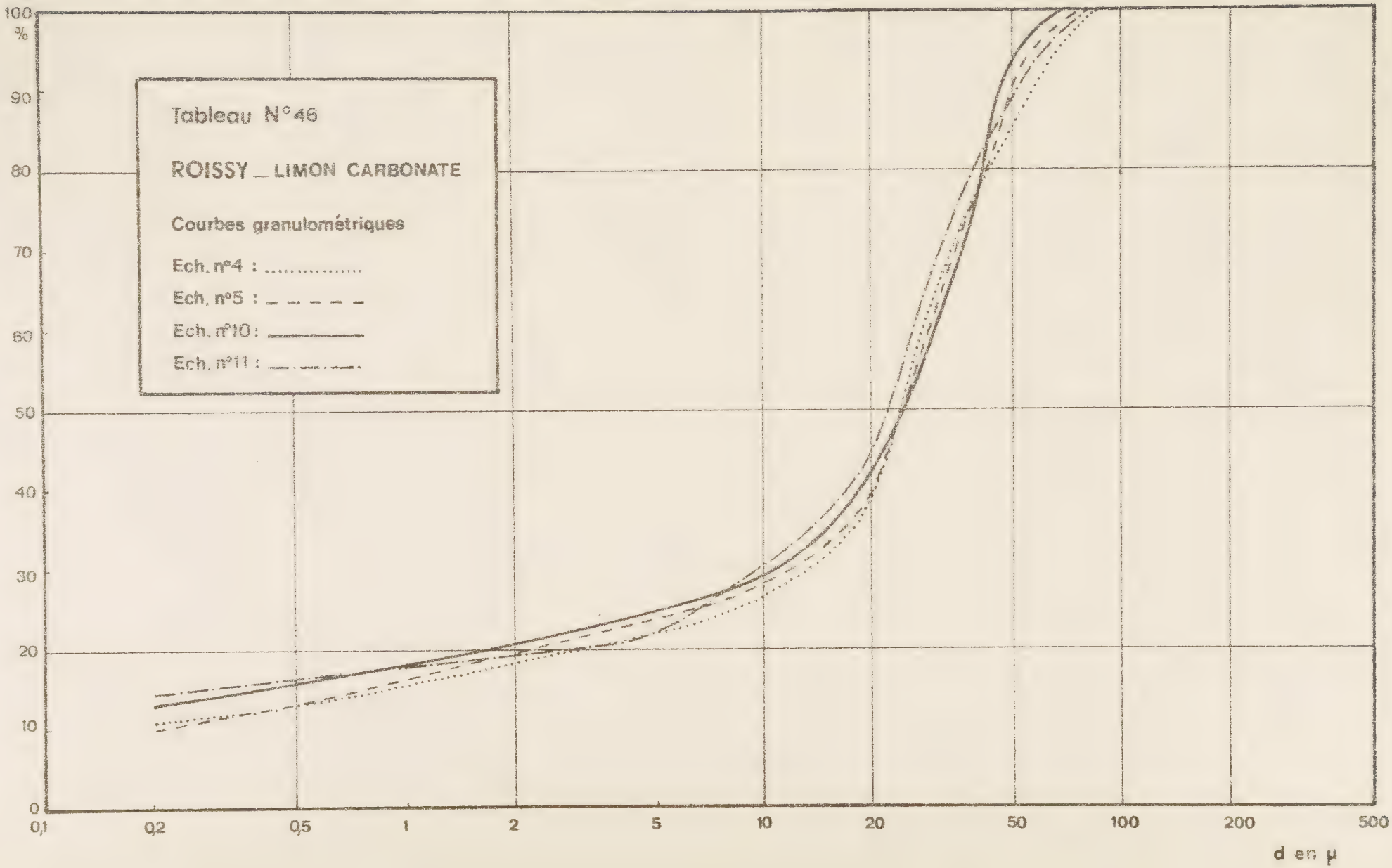


Tableau N°46
ROISSY _ LIMON CARBONATE
Courbes granulométriques
Ech. n°4 : .....
Ech. n°5 : _ _ _ _ _
Ech. n°10 : _____
Ech. n°11 : _ . _ . _ .
100
%
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0,1
0,2
0,5
1
2
5
10
20
50
100
200
500
d en µ

TABLEAU Nº 47

Nº ech / Minéraux	4	5	6	10	11	12
Quartz	ta	ta	ta	ta	ta	ta
Feldspath	f	f	f	p	p	f
Calcite	f	f	p	f	f	p
Dolomie	.	.	.	.	.	.
Min.argileux	f	f	a	a	a	f

Minéralogie du limon carbonaté
(ech brut)

Légende : ta = très abondant
a = abondant
f = faible
p = présent
t = traces

TABLEAU Nº 48

Nº ech / Minéraux	4	5	6	10	11	12
Illite	5	5	5	4	4	4
Montmorillonite	3	3	4	4	4	4
Kaolinite	2	2	1	2	2	2

Minéralogie de la fraction
argileuse du limon carbonaté.

(estimations en parties sur 10.)

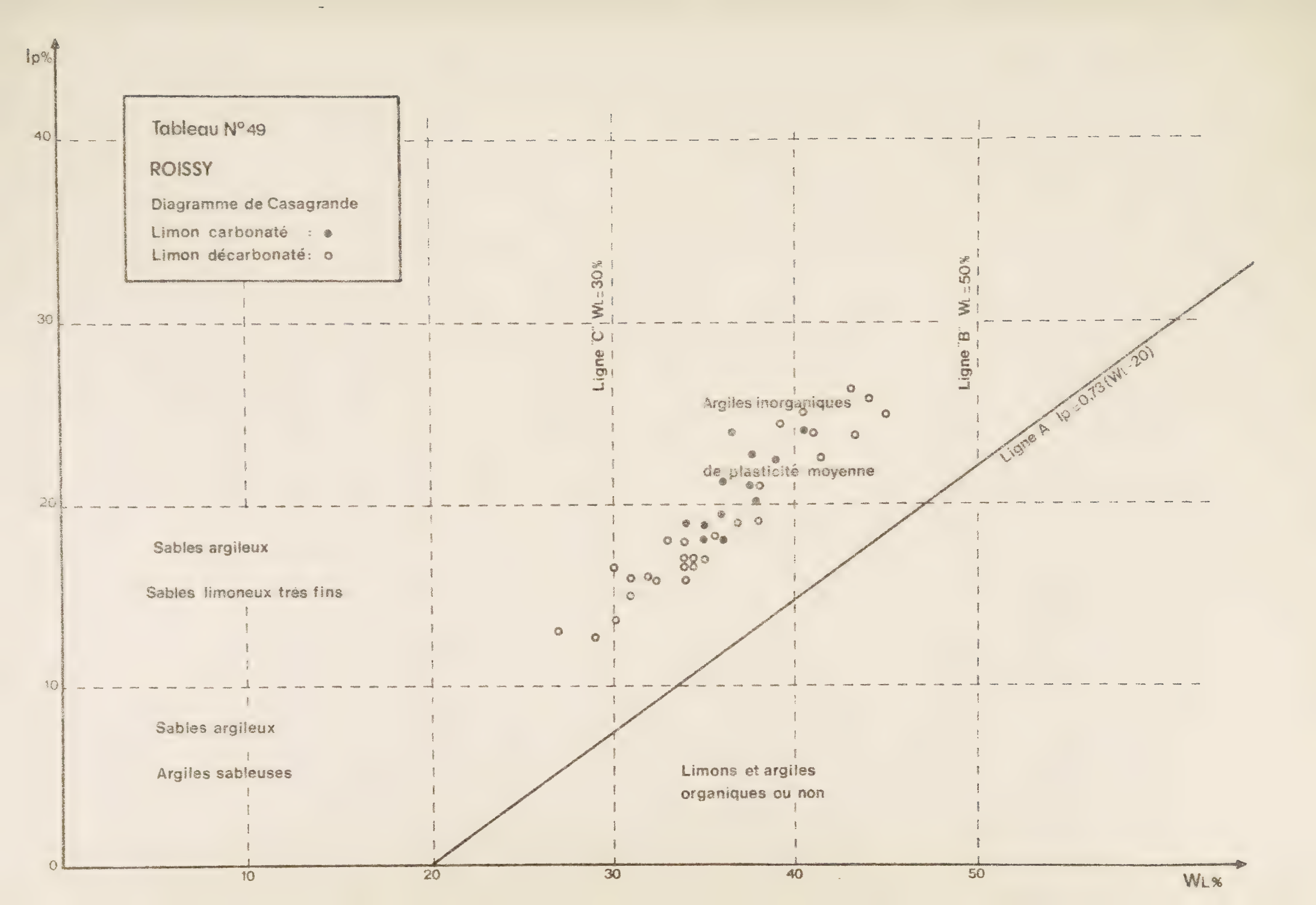


Tableau N°49
ROISSY
Diagramme de Casagrande
Limon carbonaté : ●
Limon décarbonaté: o
Ip%
WL%
0
10
20
30
40
50
Ligne "C" WL=30%
Ligne "B" WL=50%
Ligne A Ip=0,73(WL-20)
Argiles inorganiques
de plasticité moyenne
Sables argileux
Sables limoneux très fins
Sables argileux
Argiles sableuses
Limons et argiles
organiques ou non

TABLEAU Nº 50

Nº ech	K en m/sec
14	5×10^{-9}
16	2×10^{-9}
21	$1,5 \times 10^{-9}$

K = coefficient de perméabilité verticale.

PERMEABILITE DU LIMON CARBONATE

TABLEAU Nº 52

Nº ech	Pc	Cc	eo	W%
14	2,3	0,23	0,710	21,0
16	3,3	0,23	0,645	19,5
21	1,8	0,23	0,690	22,6

RESULTATS DES ESSAIS A L'OEDOMETRE SUR LIMON CARBONATE

légende : Pc = pression de consolidation
Cc = coefficient de compressibilité
Eo = indice des vides initial
W = teneur en eau

TABLEAU Nº 53

Nº ech	Ca	ϕ a	Ci	ϕi
13	0,65	0	0,18	24
14	0,70	0	0,20	25
22	0,90	0	0,15	26

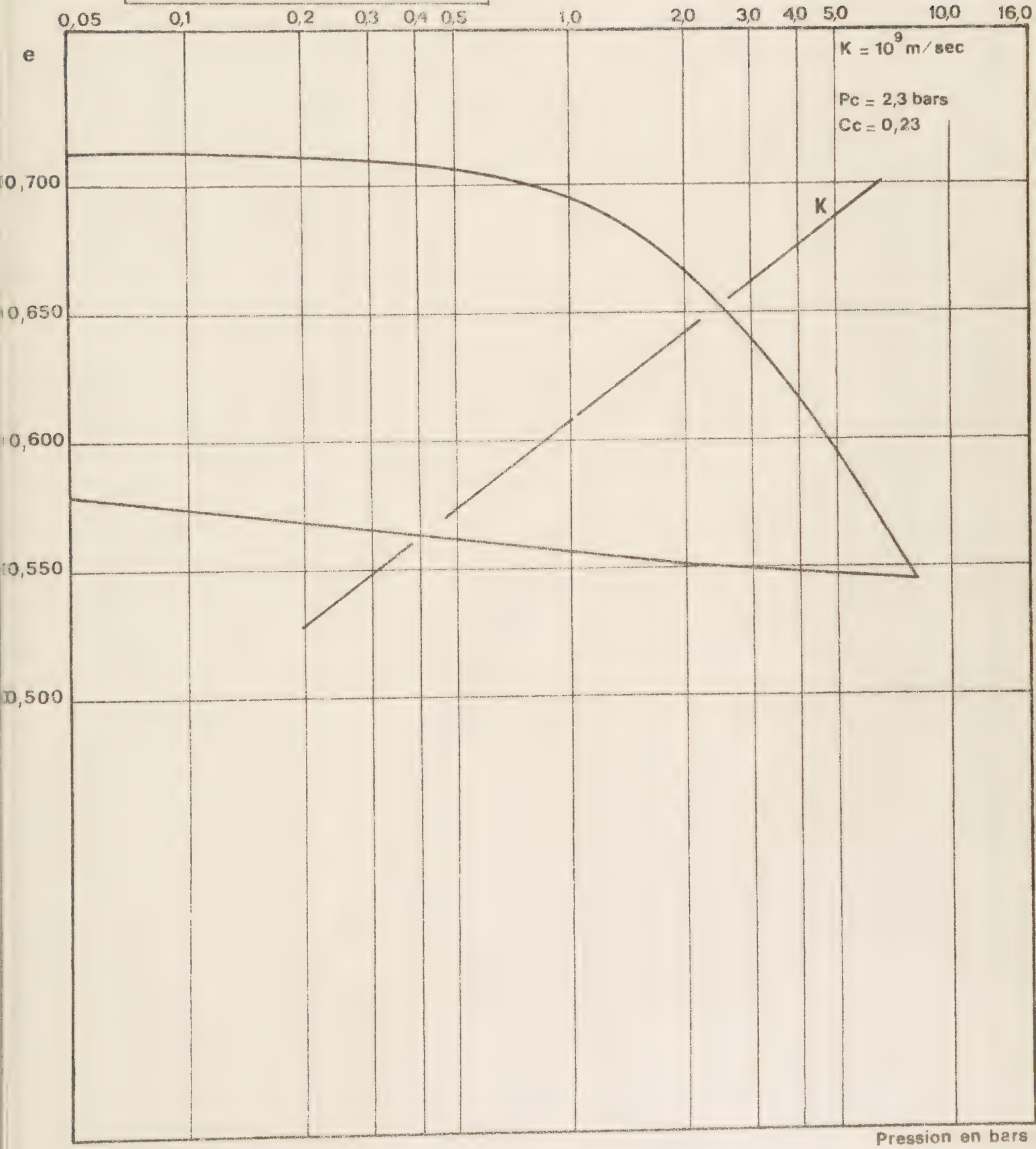
RESULTATS DES ESSAIS AU TRIAXIAL SUR LIMON CARBONATE.

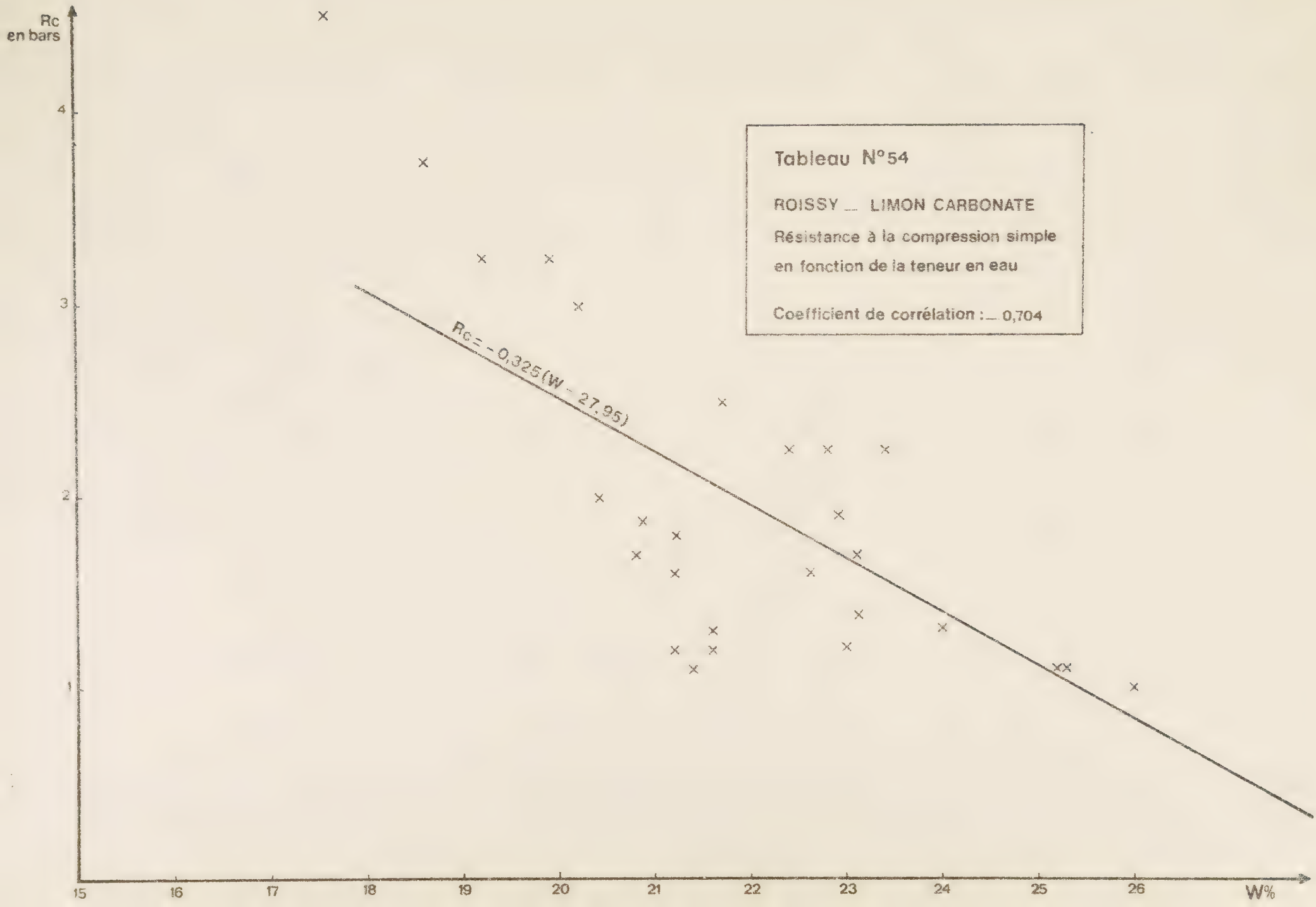
ϕi = angle de frottement intergranulaire en degré
ϕa = angle de frottement apparent en degré
Ci = cohésion intergranulaire
Ca = cohésion apparente.

Tableau N°51

ROISSY — LIMON CARBONATE

Courbes à l'œdomètre / Ech. n° 14




Rc
en bars
4
3
2
1
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
W%
Rc = - 0,325 (W - 27,95)
Tableau N°54
ROISSY _ LIMON CARBONATE
Résistance à la compression simple
en fonction de la teneur en eau
Coefficient de corrélation : _ 0,704

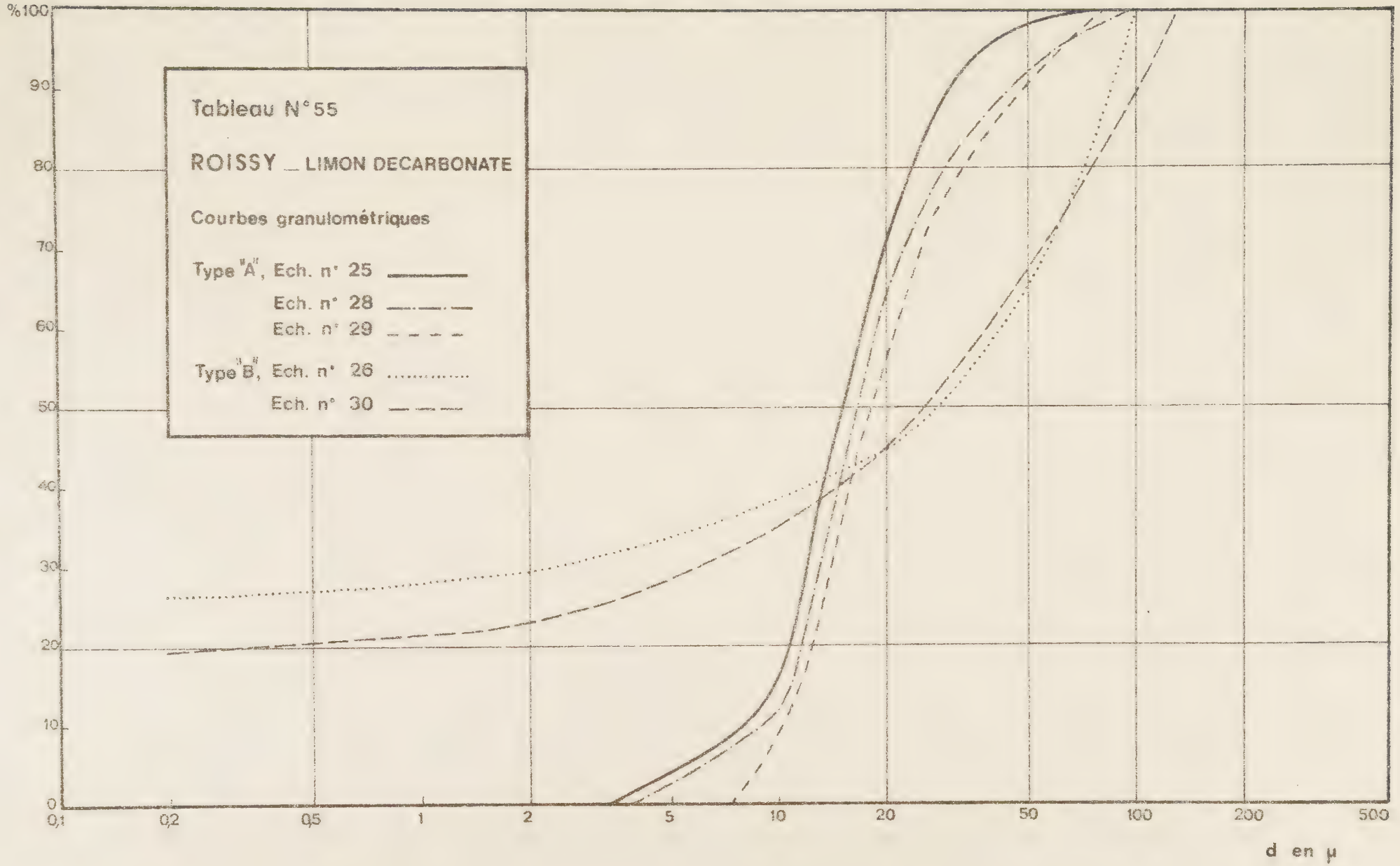


Tableau N°55
ROISSY _ LIMON DECARBONATE
Courbes granulométriques
Type "A", Ech. n° 25
Ech. n° 28
Ech. n° 29
Type "B", Ech. n° 26
Ech. n° 30
%100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0,1
0,2
0,5
1
2
5
10
20
50
100
200
500
d en µ

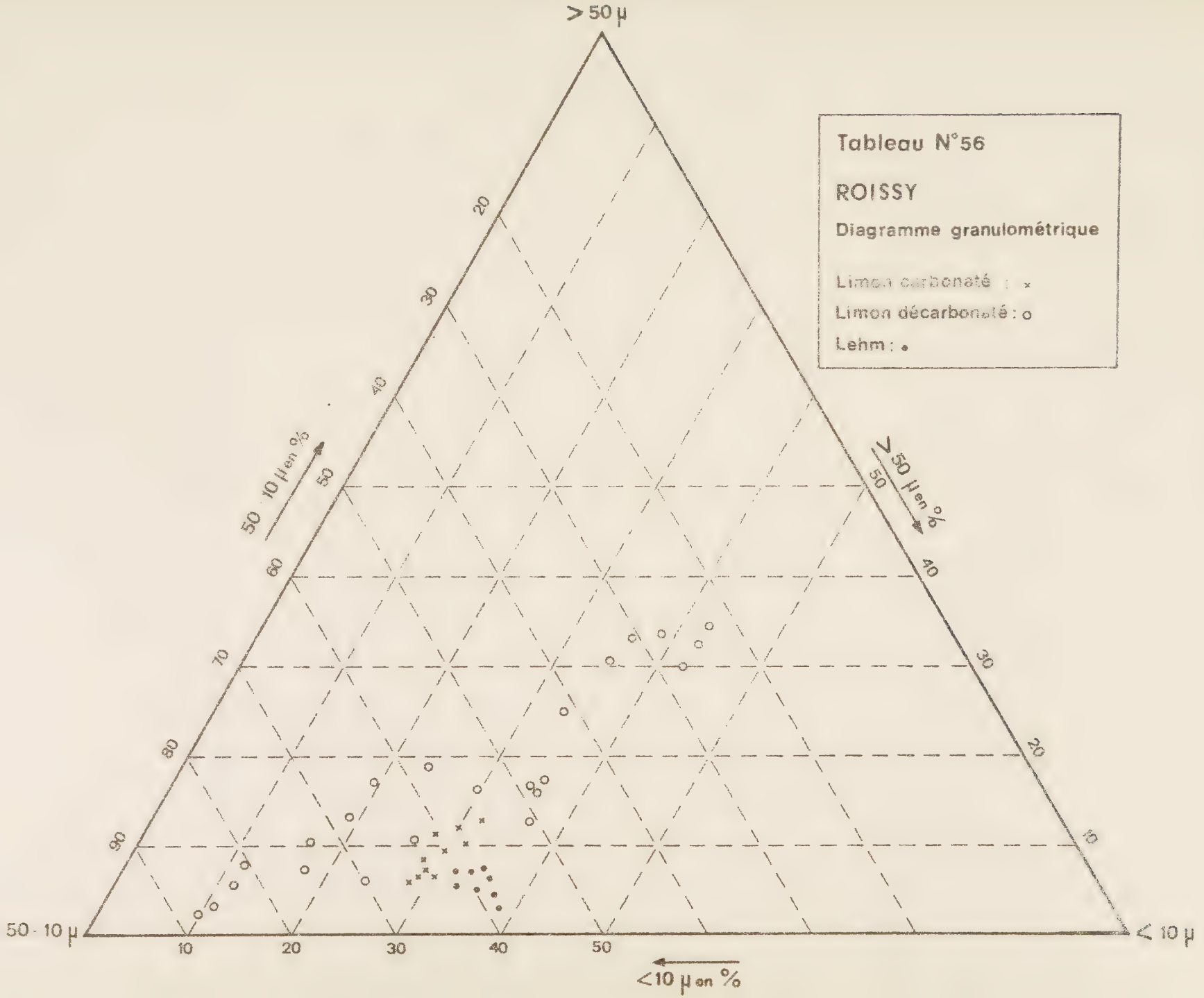


Tableau N°56

ROISSY

Diagramme granulométrique

Limon carbonaté : ×

Limon décarbonaté : o

Lehm : •

TABLEAU N° 57

Nº ech / Minéraux	23	24	25	26	27	28	29	30	31	12
Quartz	ta	ta	ta	ta	ta	ta	ta	ta	ta	ta
Feldspath	f	f	p	f	p	f	f	p	p	p
Calcite	t?	t?	•	•	•	•	•	•	•	•
Min.argileux	a	a	a	f	f	•	•	a	a	a

Minéralogie du limon décarbonaté (ech brut)

ta = très abondant
a = abondant
f = faible
p = présent
t = traces

TABLEAU Nº 58

Nº ech / Minéraux	23	24	25	25	27	30	31	12
Illite	4	5	6	6	5	6	7	6
Montmorillonite	4	4	2	2	4	3	2	3
Kaolinite	2	1	2	2	1	1	1	1

Minéralogie de la fraction argileuse du limon décarbonaté (estimation en partie sur 10.)

TABLEAU Nº 59

Nº ech	K en m/sec
52	3×10^{-8}
53	4×10^{-9}
51	2×10^{-9}
54	4×10^{-9}
32	2×10^{-9}
54bis	2×10^{-8}
60	10×10^{-10}

PERMEABILITE DU LIMON DECARBONATE.

K = coefficient de perméabilité verticale.

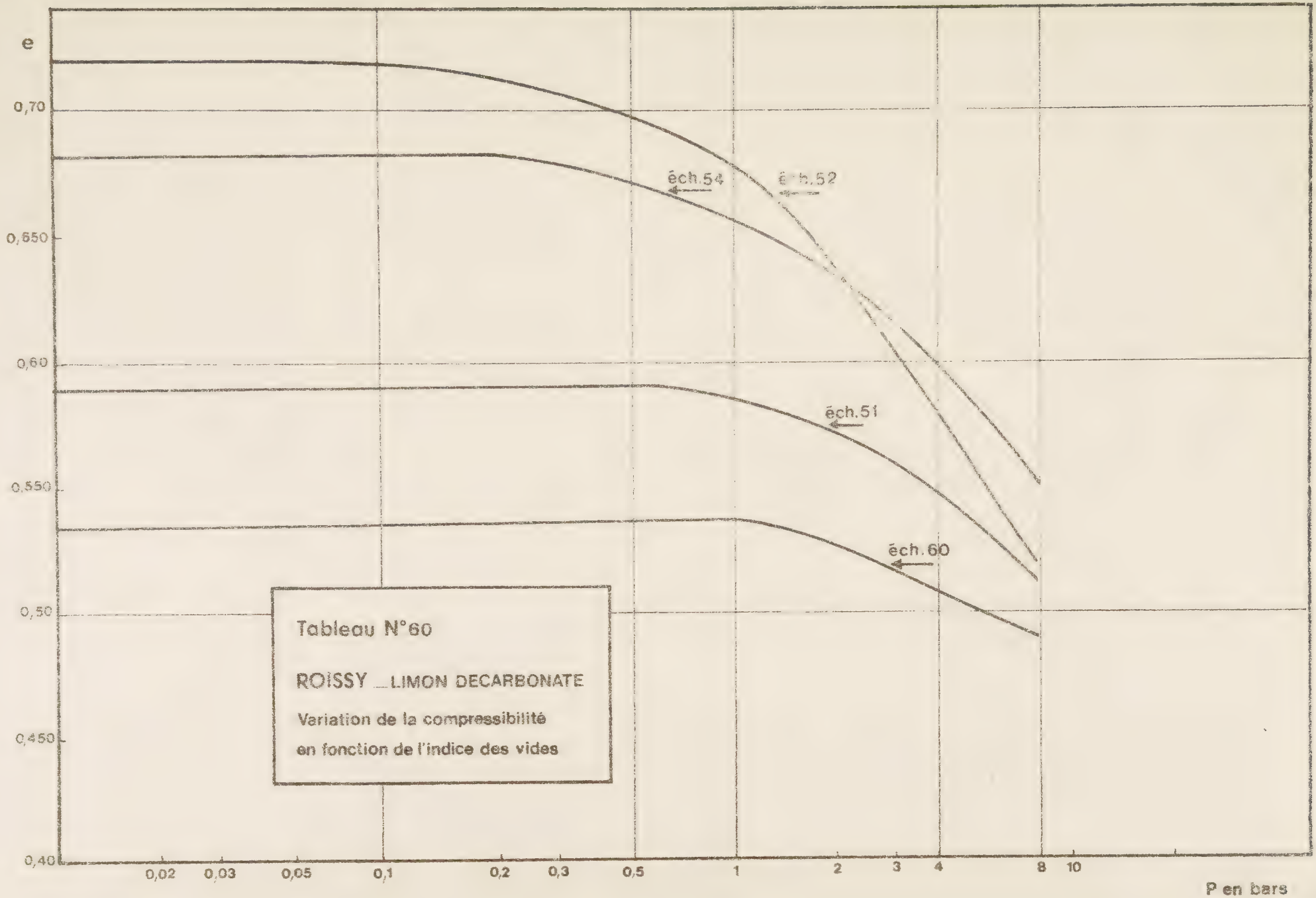


Tableau N°60

ROISSY _ LIMON DECARBONATE

Variation de la compressibilité
en fonction de l'indice des vides

TABLEAU Nº 61

Nº ech	Pc	Cc	eo	W %
52	1,5	0,24	0,725	24,0
53	2,0	0,100	0,615	22,6
51	4,4	0,200	0,590	17,5
54	2,0	0,21	0,682	22,9
32	3,0	0,23	0,735	21,0
54bis	3,0	0,112	0,640	20,3
60	2,8	0,13	0,580	21,6

Essais à l'oedomètre sur le limon décarbonaté.

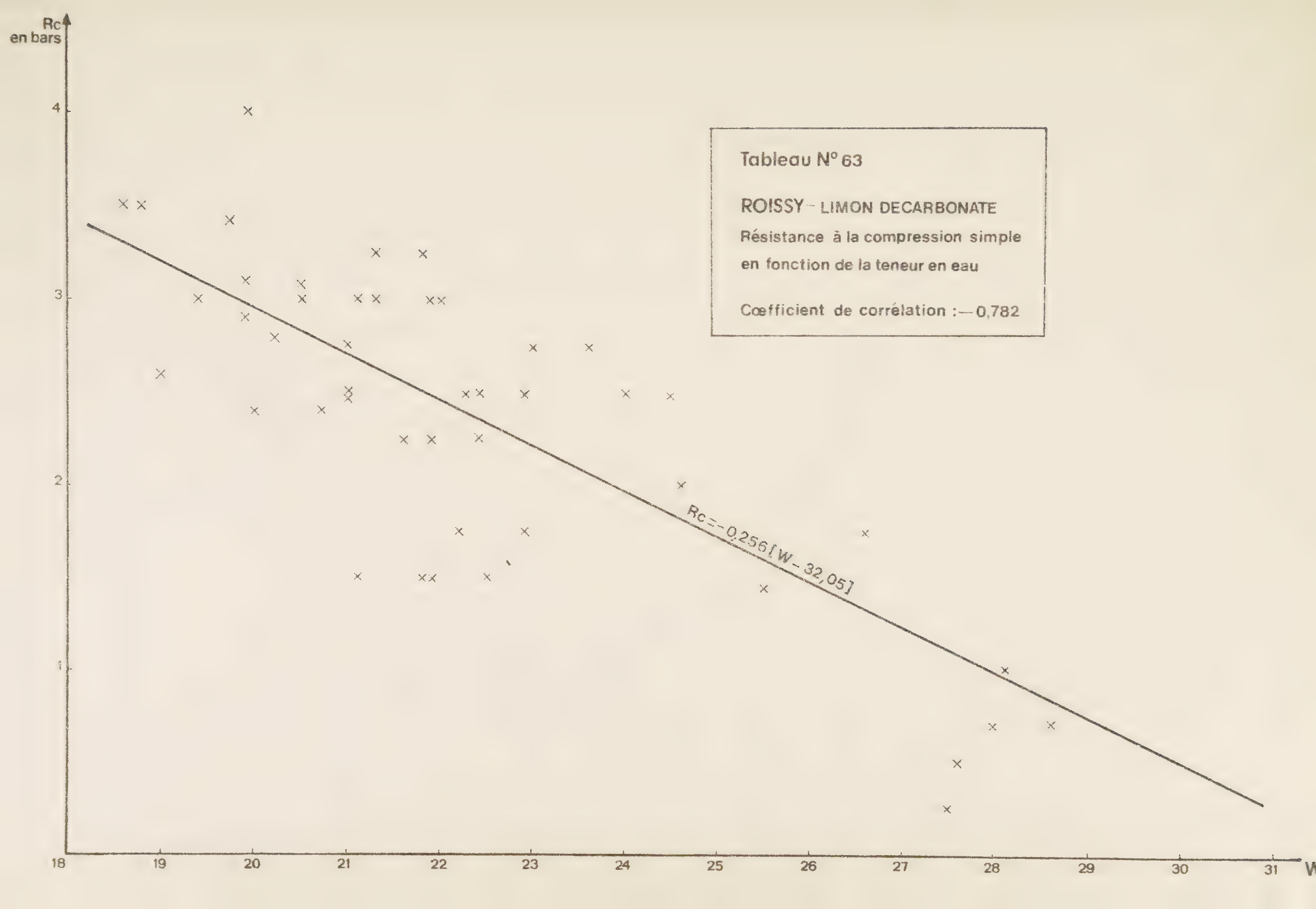
Pc = pression de consolidation
Cc = coefficient de compressibilté
eo = indice des vides initial
W = teneur en eau

TABLEAU Nº 62

Nº ech	Ca	ϕa	Ci	ϕi
52	0,8	0	0,15	26
53	1,7	0	0,15	26
50	1,3	0	0,12	25
51	1,2	0	0,13	24
54				

Essais au triaxial sur limon décarbonaté.

ϕi = angle de frottement intergranulaire en degré
ϕa = angle de frottement apparent
Ci = cohésion intergranulaire
Ca = cohésion apparente.


Rc
en bars
4
3
2
1
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
W
Tableau N° 63
ROISSY - LIMON DECARBONATE
Résistance à la compression simple
en fonction de la teneur en eau
Cœfficient de corrélation : — 0,782
Rc = - 0,256 [W - 32,05]

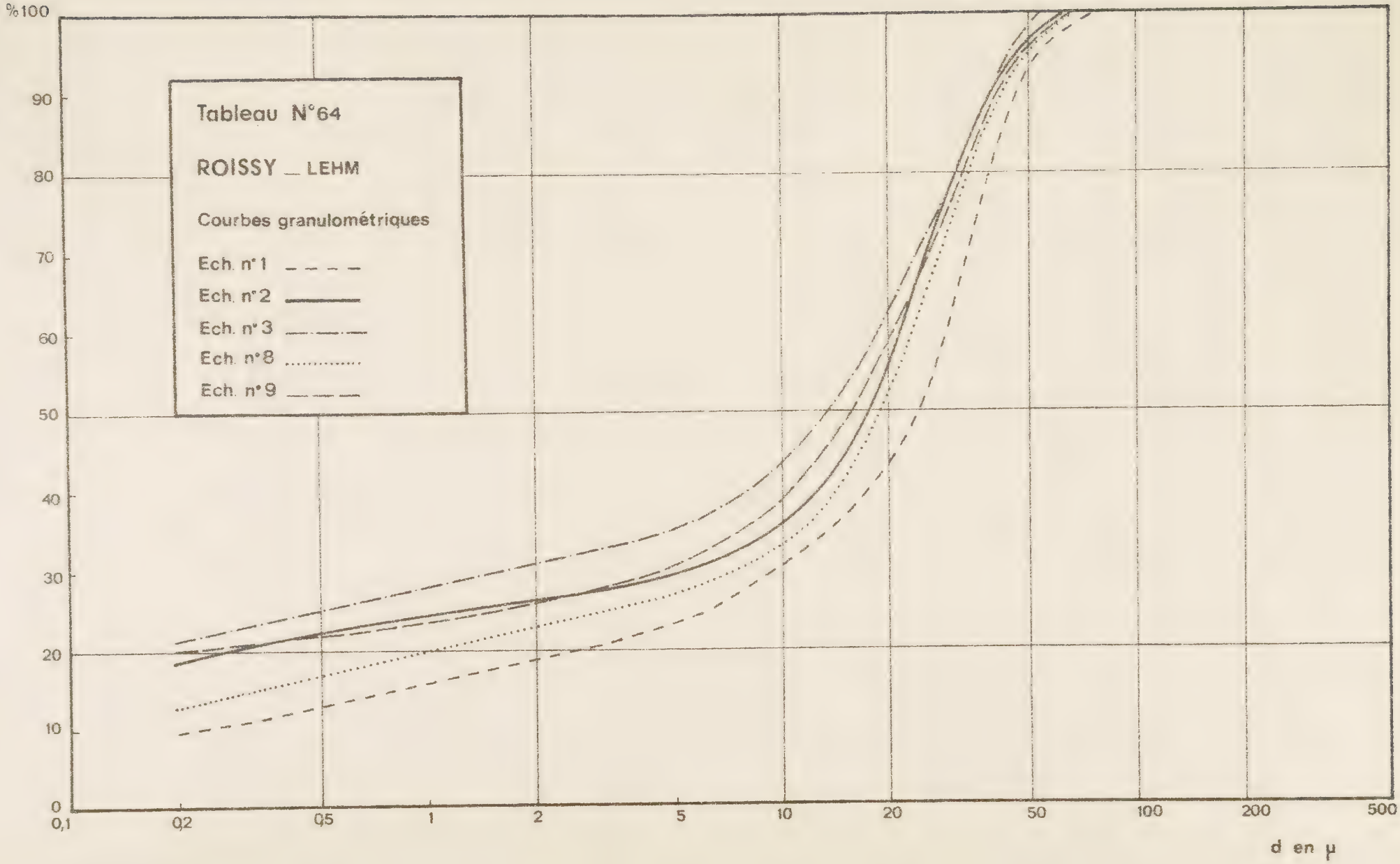


Tableau N°64
ROISSY _ LEHM
Courbes granulométriques
Ech. n°1
Ech. n°2
Ech. n°3
Ech. n°8
Ech. n°9
%100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0,1
0,2
0,5
1
2
5
10
20
50
100
200
500
d en µ

TABLEAU Nº 65

Nº ech / Minéraux	1	2	3	8	9
Quartz	ta	ta	ta	ta	ta
Feldspath	f	f	p	p	p
Calcite	.	.	.	.	.
Min.argileux	f	a	a	a	a

MINERALOGIE DU LEHM (ech brut)

ta = très abondant
a = abondant
f = faible
p = présent
t = traces

TABLEAU Nº 66

Nº ech / Minéraux	1	2	3	8	9
Illite	6	5	6	7	6
Montmorillonite	3	3	3	2	3
Kaolinite	1	2	1	1	1
Illite-Montm.		t	t	t	t

MINERALOGIE DE LA FRACTION ARGILEUSE DU LEHM (proportion estimée en parties sur 10. t = traces)

TABLEAU Nº 67

Nº ech	K en m/sec
61	3×10^{-9}
62	10×10^{-10}
71	5×10^{-9}

PERMEABILITE DU LEHM

K = coefficient de perméabilité verticale.

TABLEAU Nº 69

Nº ech	Pc	Cc	eo	W
61	3,3	0,20	0,625	21,2
62	3,36	0,28	0,780	20,5
71	1,6	0,26	0,740	24,0

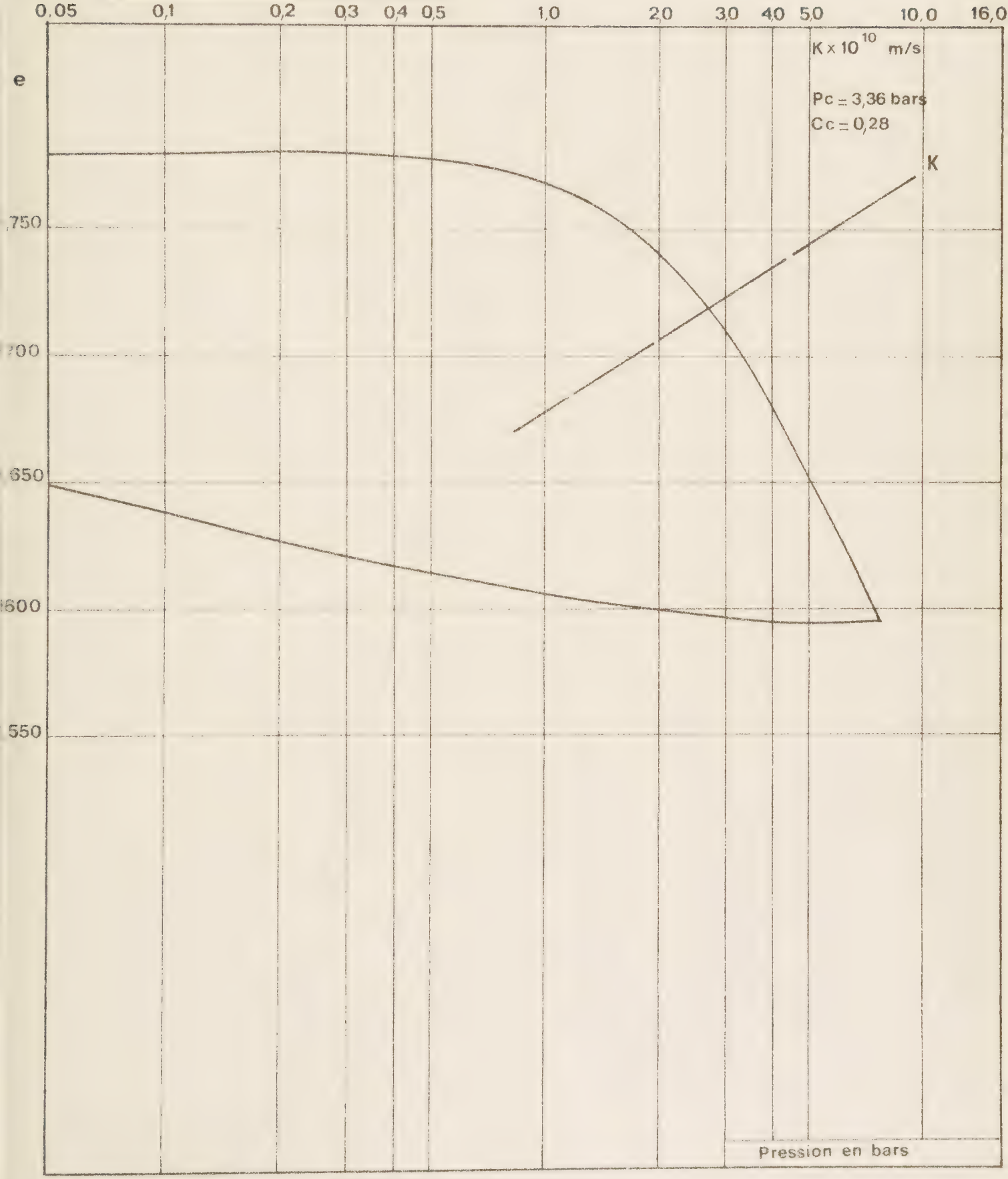
ESSAIS A L'OEDOMETRE SUR LE LEHM.

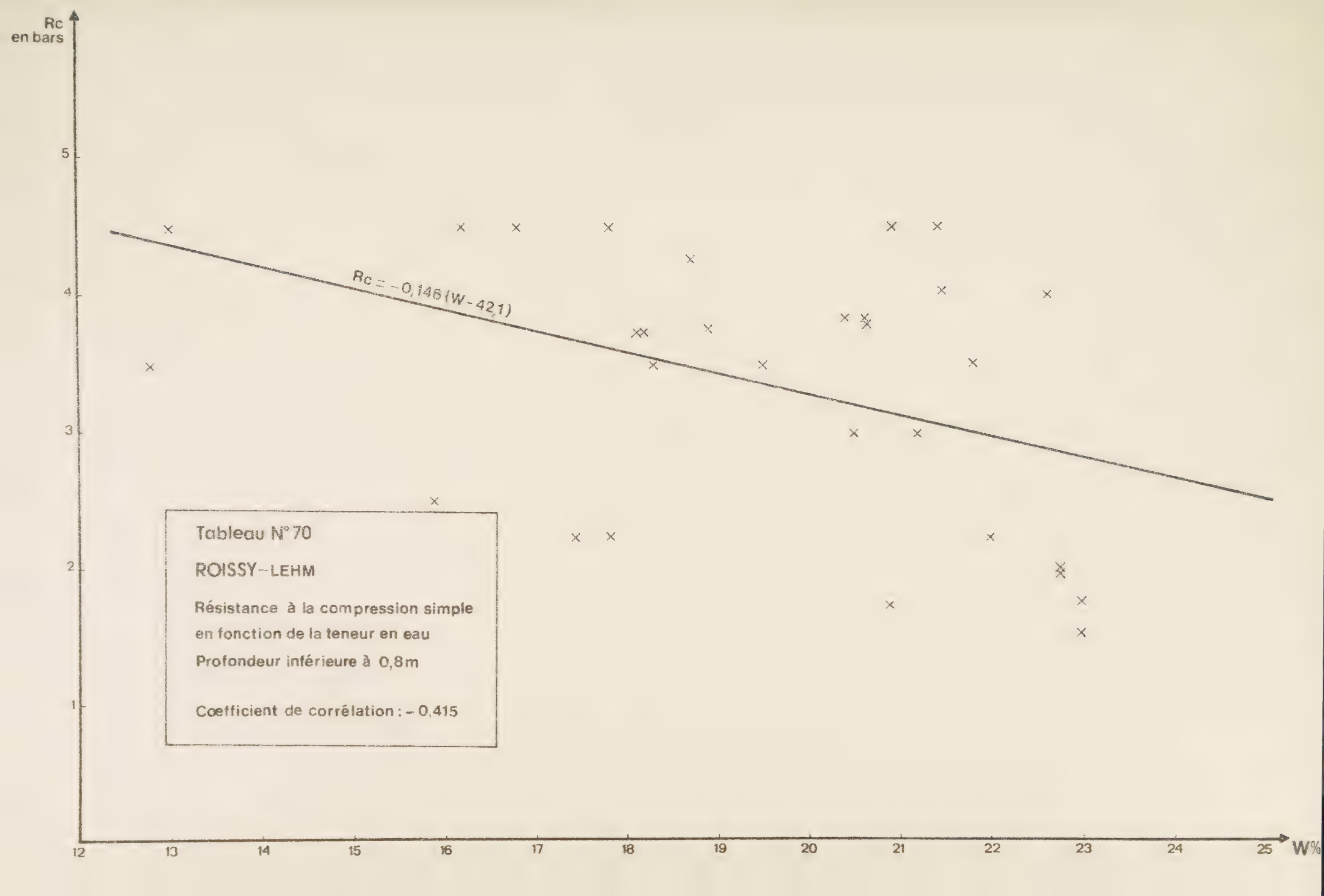
Pc = pression de consolidation
Cc = coefficient de compressibilité
eo = indice des vides initial
W = teneur en eau

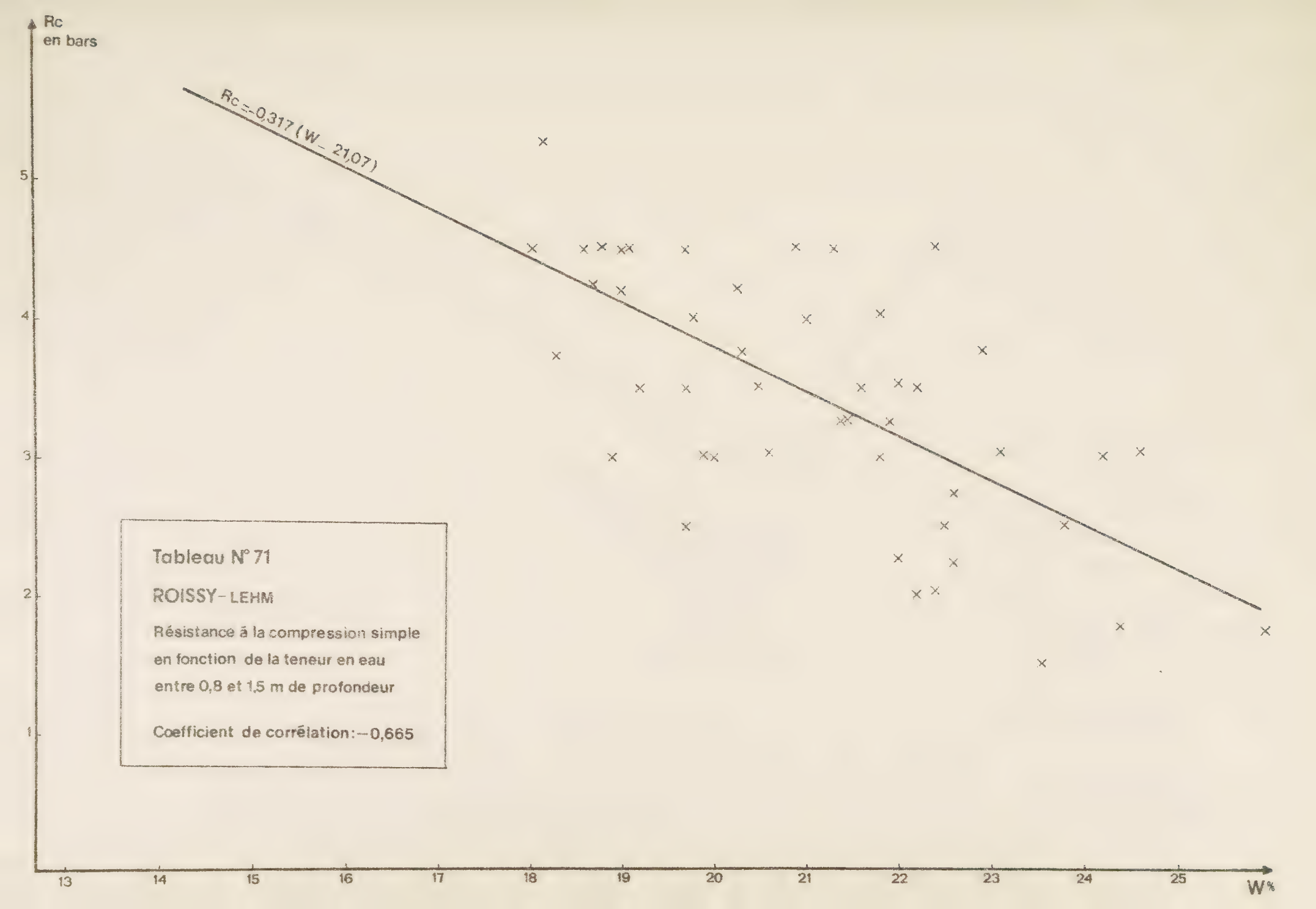
Tableau N°68

ROISSY — LEHM

Courbes à l'œdomètre / Ech. n°62




Rc
en bars
5
4
3
2
1
Rc = -0,146 (W-42,1)
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
W%
Tableau N° 70
ROISSY--LEHM
Résistance à la compression simple
en fonction de la teneur en eau
Profondeur inférieure à 0,8m
Coefficient de corrélation : - 0,415


Rc
en bars
Rc = -0,317 (W - 21,07)
5
4
3
2
1
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
W%
Tableau N° 71
ROISSY - LEHM
Résistance à la compression simple
en fonction de la teneur en eau
entre 0,8 et 1,5 m de profondeur
Coefficient de corrélation : - 0,665

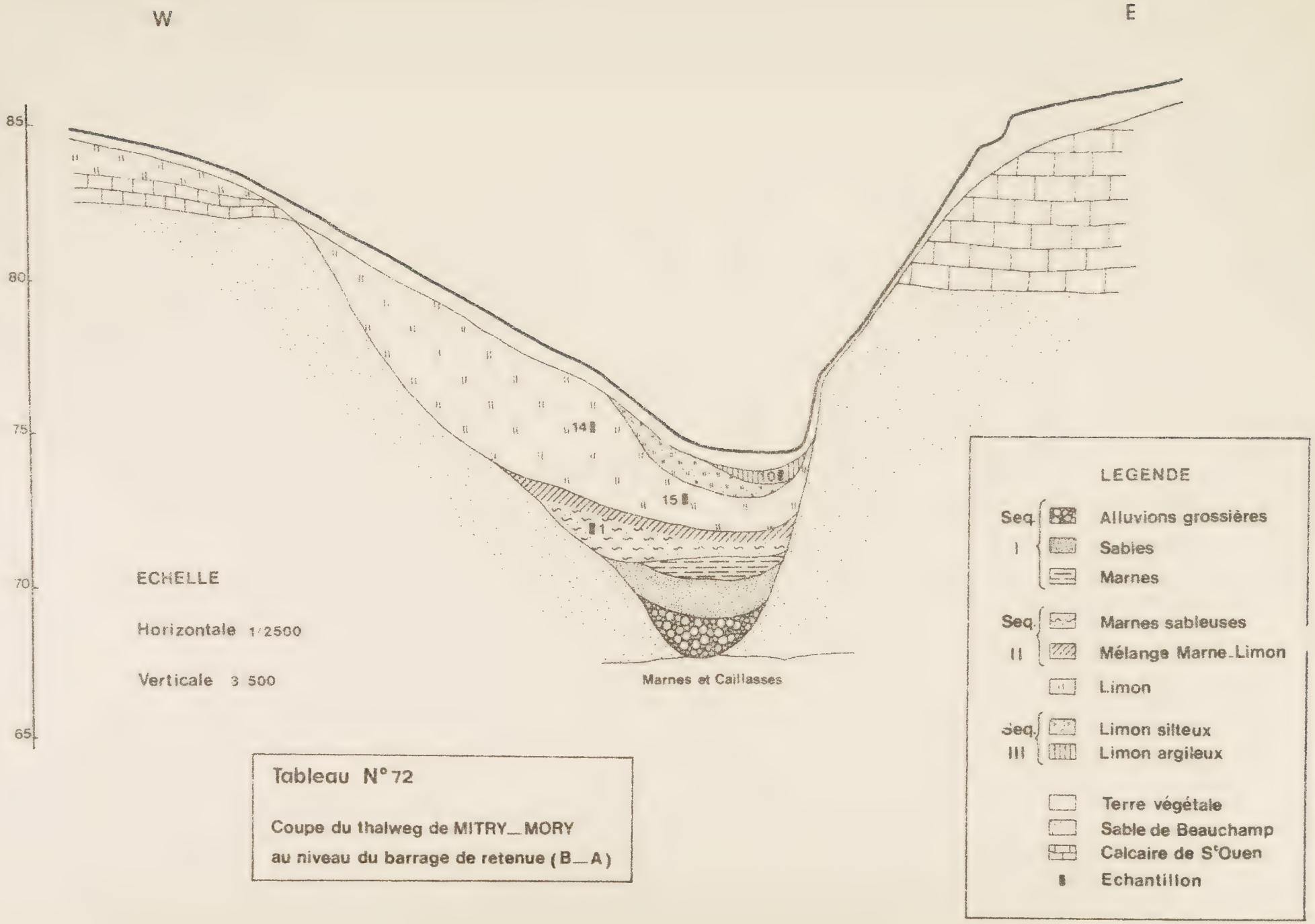


Tableau N° 72

Coupe du thalweg de MITRY—MORY
au niveau du barrage de retenue (B—A)

TABLEAU Nº 74

Séquence 2 : résultats des essais.

Ech nº = 1 (couche sablo-marneuse)

d = 1,87

Triaxial : Ca = 0,4

$\phi a = 19º$

Ci = 0,4

$\phi i = 29º$

Ech nº = 2 (couche marno-limoneuse)

d = 1,67 $Ca\ CO3 = 18,8\%$

limites d'Atterberg : $W_l = 32,8$

$W_p = 15,6$

$I_p = 17,2$

Perméabilité : $K = 5 \times 10^{-10}$ m/sec

Oedomètre = Pc = 2,3

Cc = 0,15

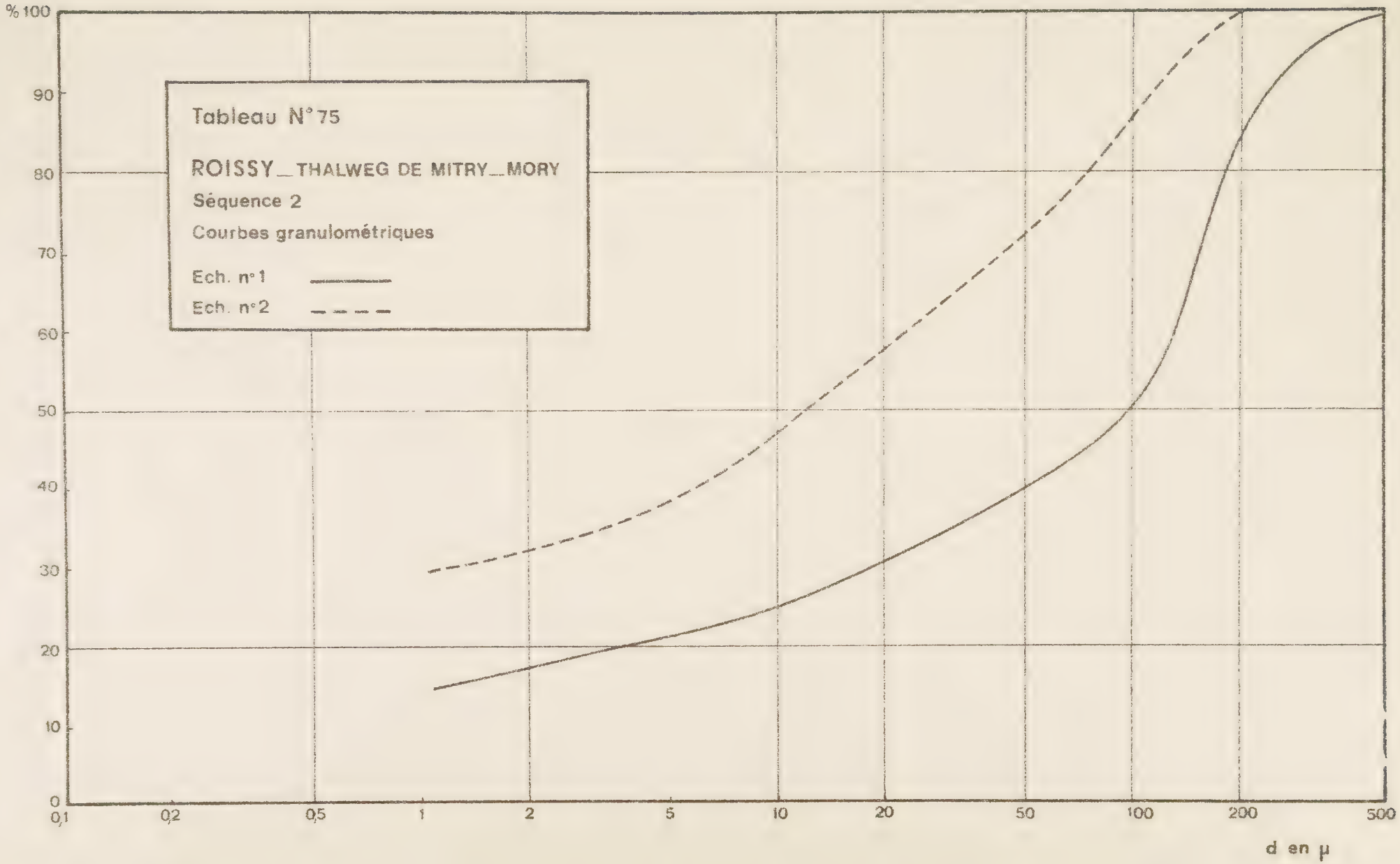


Tableau N°75
ROISSY_THALWEG DE MITRY_MORY
Séquence 2
Courbes granulométriques
Ech. n°1
Ech. n°2
% 100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0,1
0,2
0,5
1
2
5
10
20
50
100
200
500
d en µ

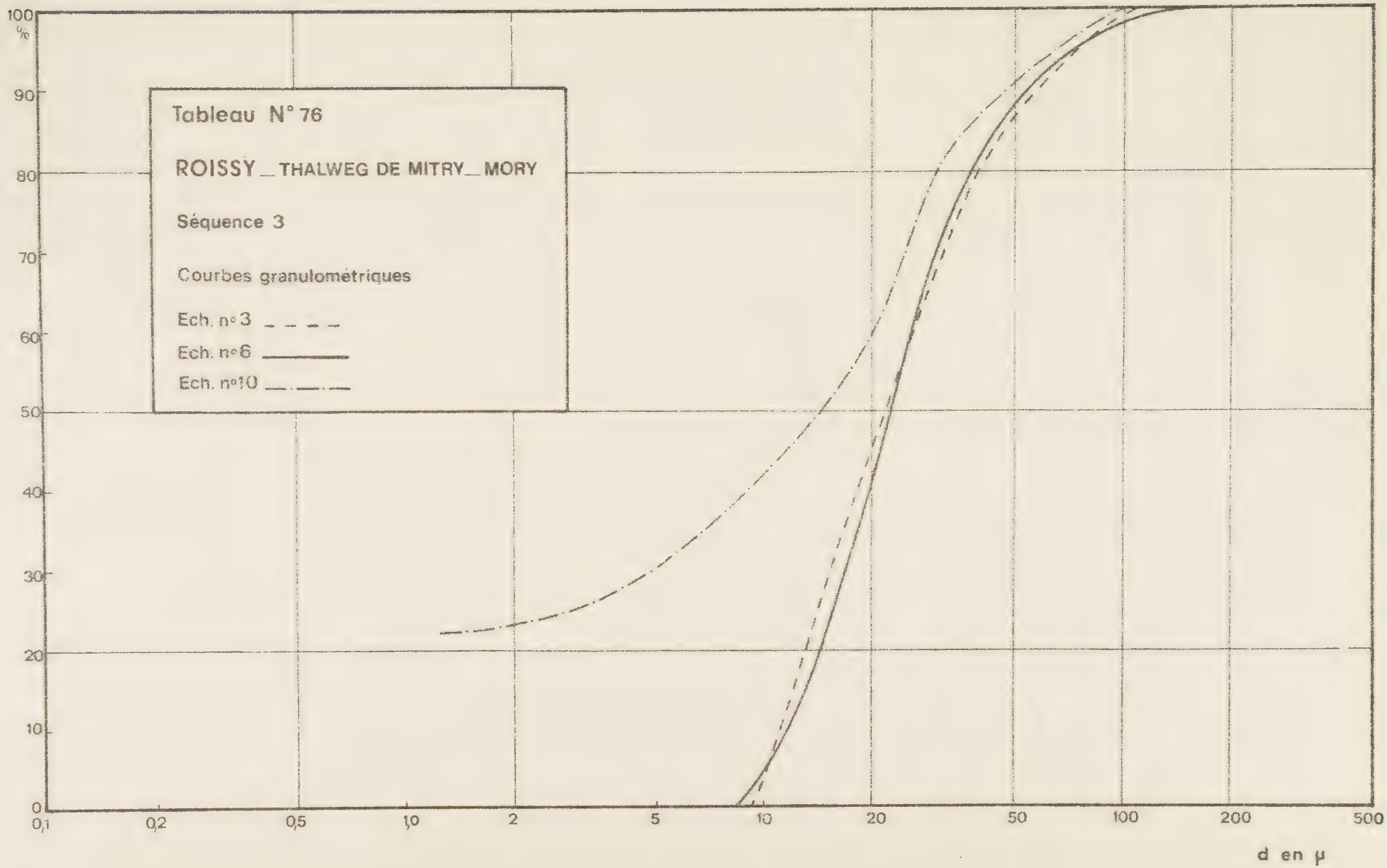


Tableau N° 76
ROISSY _ THALWEG DE MITRY _ MORY
Séquence 3
Courbes granulométriques
Ech. n° 3
Ech. n° 6
Ech. n° 10
100
%
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0,1
0,2
0,5
1,0
2
5
10
20
50
100
200
500
d en μ

TABLEAU Nº 77

Séquence 3 : résultats des essais (couche limoneuse)

- limites d'Atterberg.

Nº ech	W_l	W_p	I_p
3	25	13	12
4	27	13	14
5	28	15	13
6	25	17	8

- teneur en carbonates.

Nº ech	teneur en Ca CO3
3	0,5
4	7,9
5	1,0
6	2,7

- Résistance à la compression simple.

Nº ech	Rc	W %
3	2,8	13,8
6	3,5	18
7	2,4	21,5

TABLEAU Nº 78

Séquence 3 : résultats des essais
(couche argilo-limoneuse.

Limites d'Atterberg

Nº ech	W_l	W_p	I_p
8	33	12	21
9	34	14	20
10	29,7	11,3	18,4

Ech nº 10

Triaxial : Ca = 0,92
$\phi a = 0º$
Ci = 0
$\phi i = 36º$

Oedomètre : Pc = 1,2 bars
Cc = 0,12

Perméabilité : $K = 4 \times 10^{-9}$ m/sec

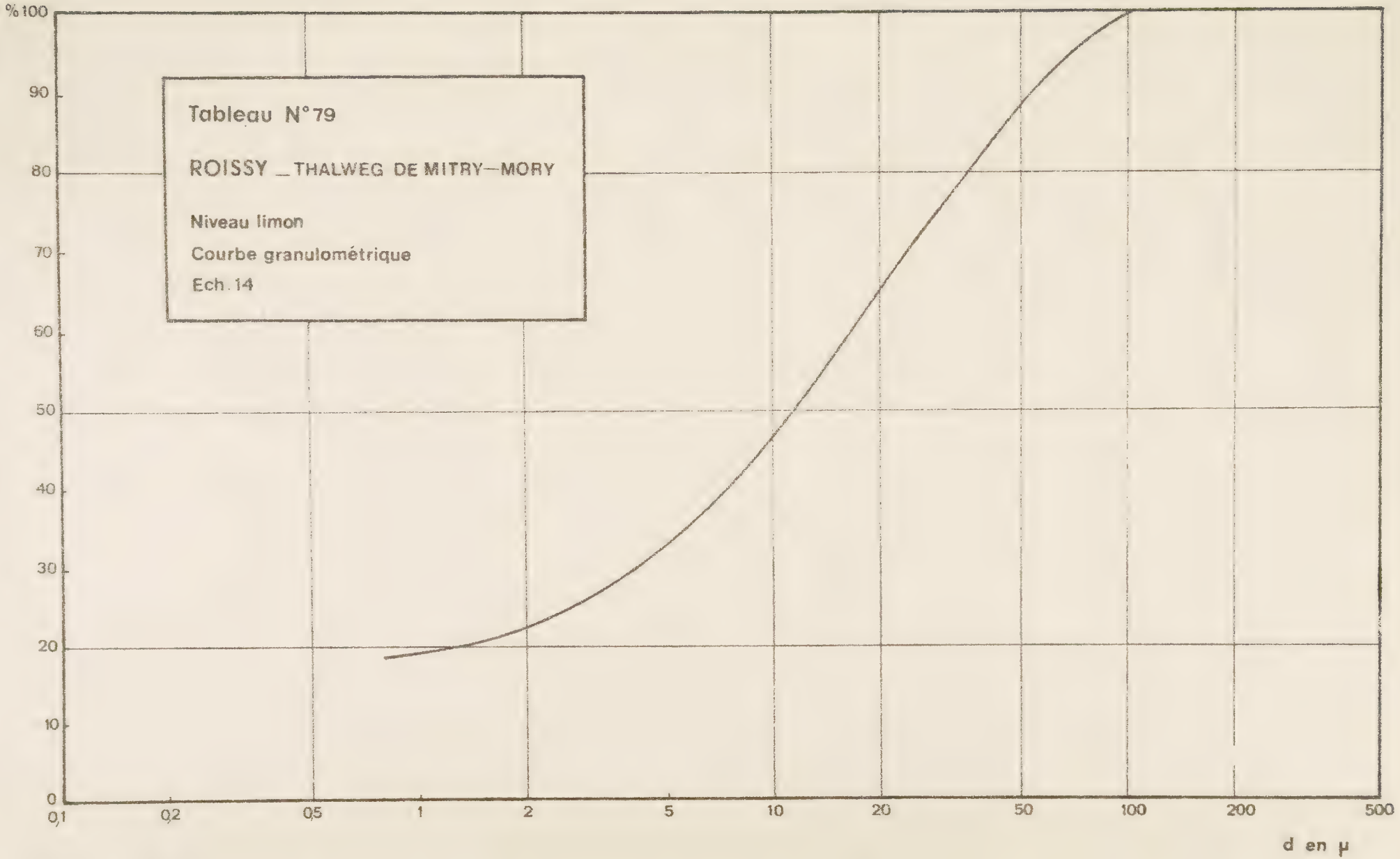


Tableau N°79
ROISSY _ THALWEG DE MITRY—MORY
Niveau limon
Courbe granulométrique
Ech. 14
%100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0,1
0,2
0,5
1
2
5
10
20
50
100
200
500
d en µ

TABLEAU Nº 80

Thalweg de Mitry-Mory
Niveau limon
Résultats des essais

Limites d'Atterberg.

Nº ech	W_l	W_p	I_p
11	36	17	19
12	36	13	23
13	37	15	22
14	42,3	19,5	22,8

Ech 14 = - γd = 1,60
1,56
1,68
- triaxial = Ca = 0,45
ϕa = 0º
Ci = 0,1
ϕi = 31º

Ech 15 = - γd = 1,66
- triaxial : Ca = 0,45
ϕa = 24º
Ci = 0,3
ϕi = 30º

Tableau N° 81

THALWEG DE MITRY_MORY _ Niveau limon

Courbes à l'œdomètre / Ech. n°15

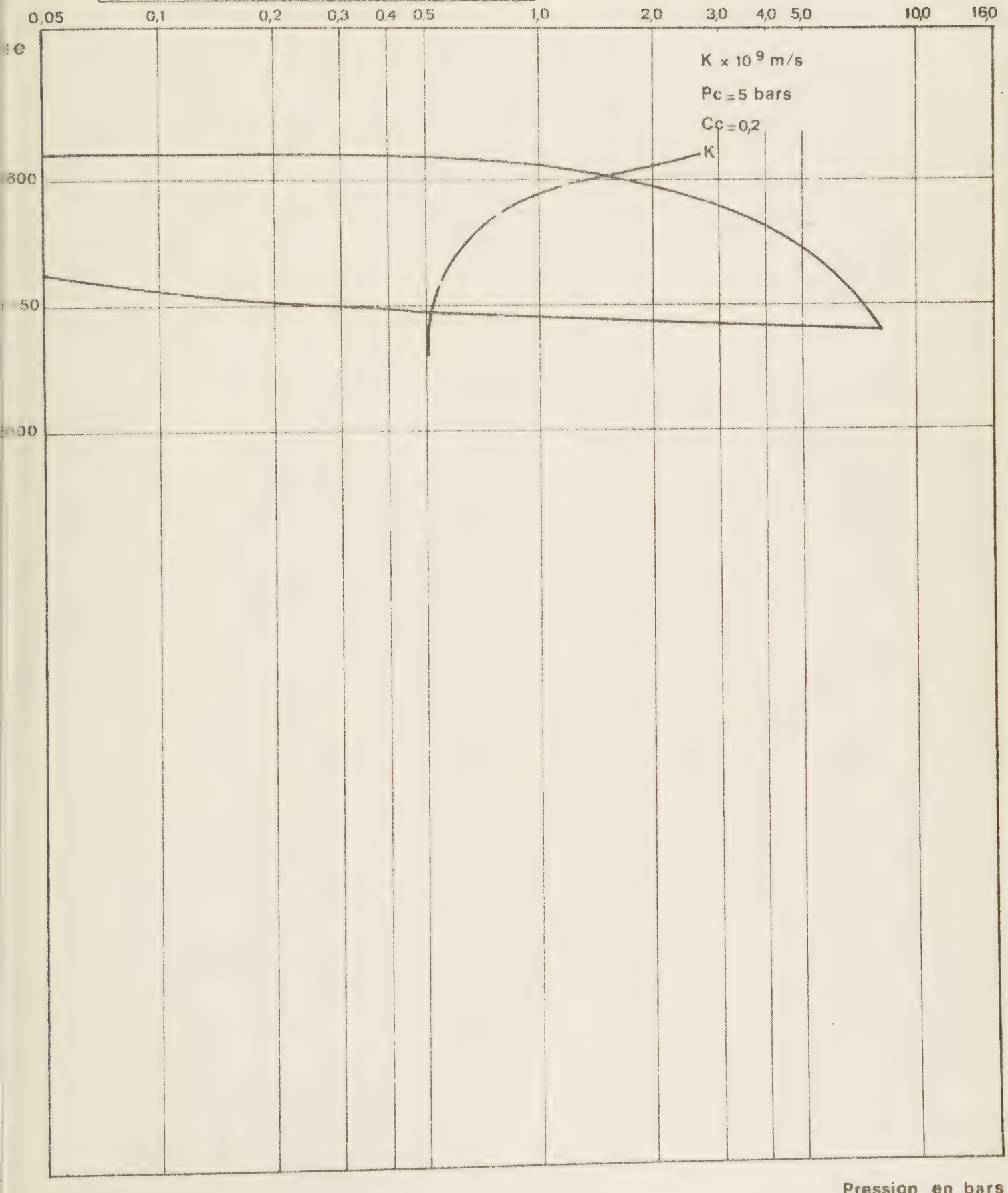
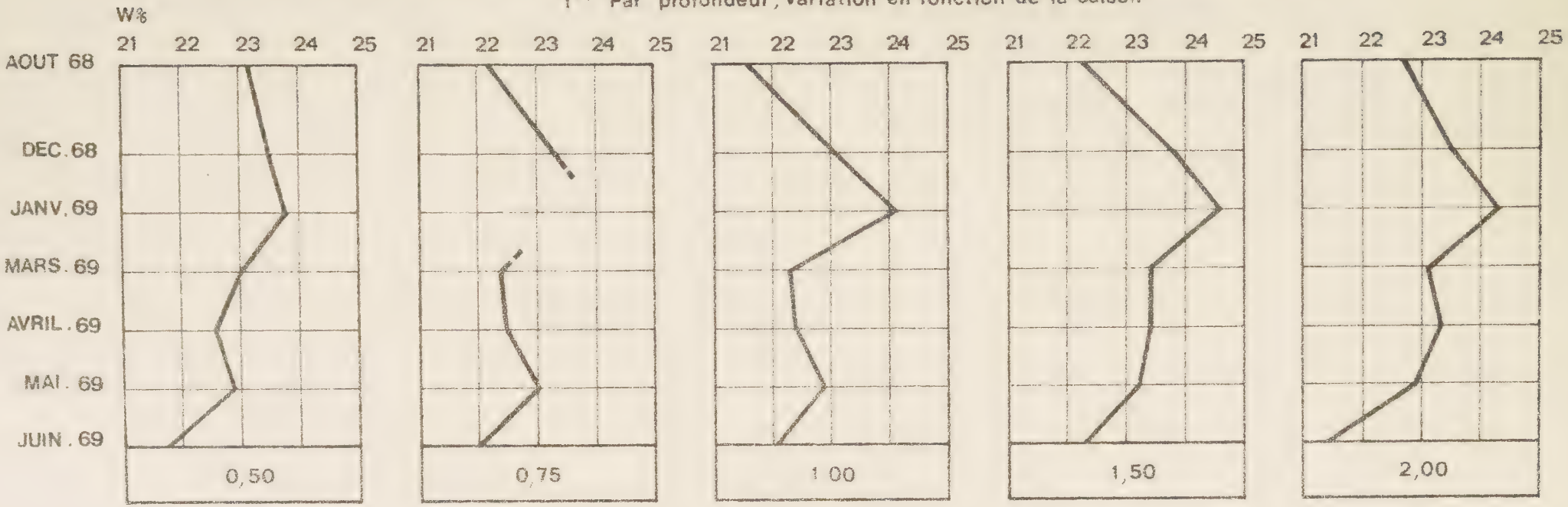


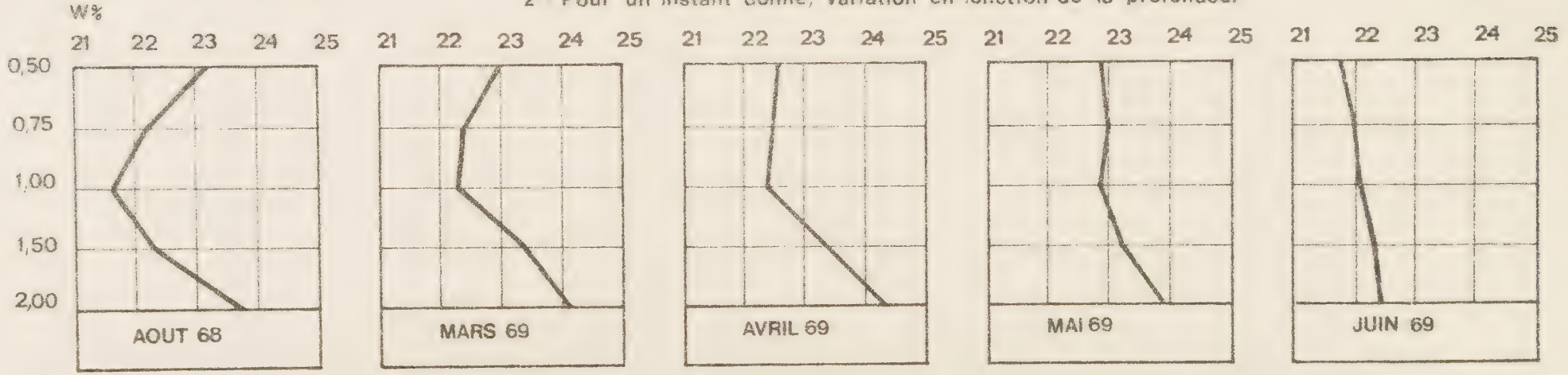
Tableau N°82 — ROISSY

VARIATIONS TENEURS EN EAU DU LIMON EN FONCTION DE LA SAISON ET DE LA PROFONDEUR

1°/ Par profondeur, variation en fonction de la saison



2°/ Pour un instant donné, variation en fonction de la profondeur



nota: W% = Teneur en eau naturelle

0,50 etc.... = profondeur

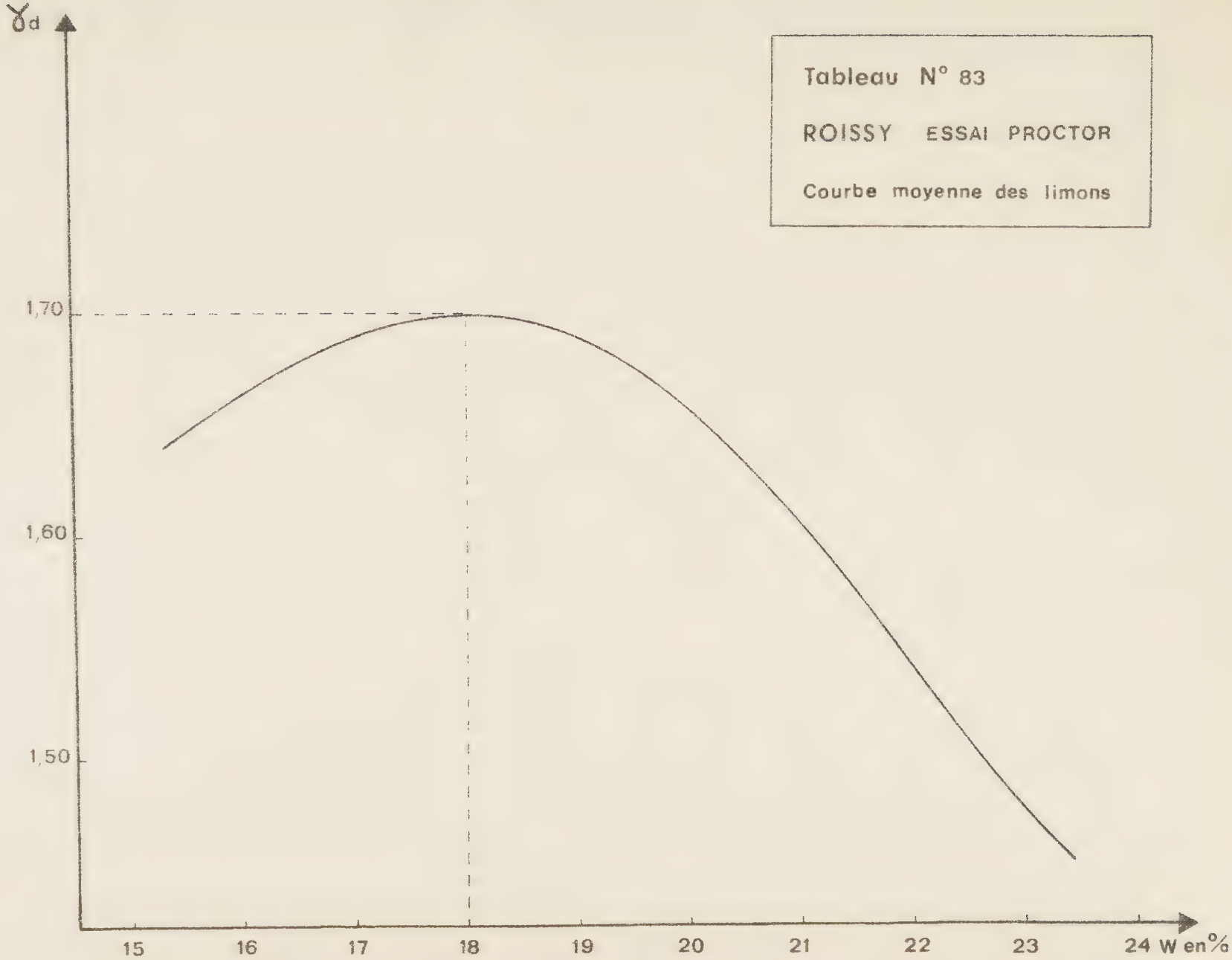


Tableau N° 83

ROISSY ESSAI PROCTOR

Courbe moyenne des limons